

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Казанский государственный энергетический университет»

На правах рукописи

**Масков Линар Рамильевич**

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОГО  
КОМПЛЕКСА ГАЗОВОГО ПРОМЫСЛА**

2.4.2 – Электротехнические комплексы и системы

**ДИССЕРТАЦИЯ**  
на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель  
доктор технических наук, профессор  
Корнилов Владимир Юрьевич

Казань – 2024

## СОДЕРЖАНИЕ

ПЕРЕЧЕНЬ СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ .....	5
ВВЕДЕНИЕ .....	7
ГЛАВА I. АНАЛИЗ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА ГАЗОВОГО ПРОМЫСЛА №1 ООО «ГАЗПРОМ ДОБЫЧА ЯМБУРГ» КАК ОБЪЕКТА ИССЛЕДОВАНИЯ .....	14
Постановка задачи .....	14
1.1. Описание газового промысла №1 ООО «Газпром добыча Ямбург» .....	15
1.1.1. Общая характеристика технологических установок ГП №1 .....	15
1.1.2. Описание ДКС .....	18
1.2. Централизованная система электроснабжения УКПГ и ДКС .....	20
1.2.1. Общее описание .....	20
1.2.2. Анализ структуры и энергетических характеристик системы электроснабжения и электротехнического комплекса ГП №1 .....	24
1.2.3. Расчет энергетических показателей .....	35
1.3. Автономная система электроснабжения УКПГ и ДКС .....	40
1.3.1. Общее описание .....	40
1.3.2. Анализ структуры и энергетических характеристик системы электроснабжения и электротехнического комплекса ГП №1 .....	41
1.3.3. Расчет топливно-энергетических параметров .....	44
Выводы по первой главе .....	48
ГЛАВА II. РАЗРАБОТКА КОМПЬЮТЕРНОЙ МОДЕЛИ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА ГАЗОВОГО ПРОМЫСЛА НА ОСНОВЕ РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ В ПРОГРАММНОМ КОМПЛЕКСЕ MATLAB/SIMULINK .....	50
Постановка задачи .....	50
2.1. Разработка модели ЭТК ГП .....	53
2.1.1. Исследование элементов модели .....	53
2.1.2. Экспериментальное исследование АД серии ВАСО16-14-24, ВАСО4-37-24 со стеклопластиковым рабочим колесом типа ГАЦ-50-4М2 на валу .....	73
2.2. Экспериментальная модель ЭТК АВО газа с централизованной СЭС .....	83

Выводы по второй главе.....	88
ГЛАВА III. РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИМ КОМПЛЕКСОМ АППАРАТОВ ВОЗДУШНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ ГАЗА.....	89
Постановка задачи.....	89
3.1. Аналитический обзор САУ АВО газа.....	90
3.1.1. Патентный обзор.....	90
3.1.2. Промышленные САУ.....	93
3.2. Разработка САУ АВО газа.....	103
3.2.1. Трехуровневый комплекс.....	103
3.2.2. Трехступенчатая защита от гидратообразования.....	108
3.2.3. Автоматический групповой запуск.....	110
3.3. Разработка алгоритмов управления.....	113
3.3.1. Прямая система пусков.....	113
3.3.2. Система «один ПЧ – один вентилятор».....	116
3.3.3. Система «один ПЧ – группа вентиляторов».....	119
3.3.4. Система «один СПП – один вентилятор».....	121
3.3.5. Система «один СПП – группа вентиляторов».....	123
Выводы по третьей главе.....	125
ГЛАВА IV. МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ПОВЫШЕНИЮ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА ГАЗОВОГО ПРОМЫСЛА №1 ООО «ГАЗПРОМ ДОБЫЧА ЯМБУРГ».....	126
4.1. Модернизация электротехнического комплекса с централизованной системой электроснабжения.....	126
4.1.1. Комбинированный метод управления.....	126
4.1.2. Электротехнический комплекс теплоснабжения газового промысла .....	131
4.2. Модернизация электротехнического комплекса с автономной системой электроснабжения.....	134
4.2.1. Единый комплекс генерации электрической энергии.....	134
4.2.2. Автономная система электроснабжения для ЭТК АВО газа.....	140
Выводы по четвертой главе.....	146
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	147

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	150
ПРИЛОЖЕНИЕ А .....	165
ПРИЛОЖЕНИЕ Б.....	166
ПРИЛОЖЕНИЕ В .....	167
ПРИЛОЖЕНИЕ Г.....	168
ПРИЛОЖЕНИЕ Д.....	169
ПРИЛОЖЕНИЕ Е.....	170
ПРИЛОЖЕНИЕ Ж .....	171
ПРИЛОЖЕНИЕ И .....	172
ПРИЛОЖЕНИЕ К .....	173

## ПЕРЕЧЕНЬ СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

ЭТК – электротехнический комплекс

СЭС – система электроснабжения

ГП – газовый промысел

УКПГ – установка комплексной подготовки газа

УППГ – установка предварительной подготовки газа

ДКС – дожимная компрессорная станция

АВО – аппарат воздушного охлаждения

ПМИ – приведенный момент инерции

СПП – система плавного пуска

ПЧ – преобразователь частоты

АД – асинхронный двигатель

САУ – система автоматического управления

ДЭС – дизельная электростанция

ЯНГКМ – Ямбургское нефтегазоконденсатное месторождение

ДЭГ – диэтиленгликоль

УОГ – установка очистки газа

КТП – комплектно-трансформаторная подстанция

КИПиА – контрольно-измерительные приборы и автоматика

УПТ – установка подключения теплоносителя

РВС – резервуар запаса воды

ГСМ – горюче-смазочные материалы

ЗРУ – закрытое распределительное устройство

ТДА – турбодетандерный агрегат

КЦ – компрессорный цех

ЭСН – электроснабжение собственных нужд

ГПУ – газопромысловое управление

ВЛ – воздушная линия

ПС – подстанция

СШ – секция шин

АСКУЭ – автоматизированная система контроля и учета электроэнергии

ГПА – газоперекачивающий агрегат

АСУ – автоматизированная система управления

НКУ – низковольтное комплектное устройство

КЛ – кабельная линия

КУ – конденсаторная установка

ЭП – электропотребитель

РУ – распределительное устройство

АВ – автоматический выключатель

ГА – генераторный автомат

АВР – автоматическое включение резерва

БСК – батарея статических конденсаторов

ЧР – частотное регулирование

ЧРП – частотно-регулируемый привод

КРМ – компенсация реактивной мощности

ПЛК – программируемый логический контроллер

КАЦС – концентратор аналогово-цифровых сигналов

БП – блок питания

УК – управляющий компьютер

ГБК – группа блок-контакторов

БК – блок контакторов

АГЗ – автоматический групповой запуск

## ВВЕДЕНИЕ

### **Актуальность и степень разработанности темы исследования.**

Одним из приоритетных научно-технических направлений исследований для нефтегазовой промышленности является повышение эффективности электротехнических комплексов (ЭТК). Актуальность данной тематики обусловлена ростом производственных мощностей, усложнением систем автоматизации и технологических процессов, повышенными требованиями к надежности и непрерывности технологических процессов промышленных предприятий нефтегазового сектора. Практическая значимость заключается в том, что от эффективности управления и функционирования всего ЭТК и его отдельных элементов зависят удельные затраты топливно-энергетических ресурсов на единицу добываемой или производимой продукции, снижение которых является одной из приоритетных задач для нефтегазовой отрасли, и имеет важное прикладное значение как с технической, так и с экономической точки зрения.

Проблематике повышения эффективности различных ЭТК в нефтегазовой промышленности посвятили свои работы отечественные авторы: Меньшов Б.Г., Ершов М.С., Суд И.И., Яризов А.Д., Артюхов И.И., Аршакян И.И., Шабанов В.А., Пашкин В.В., Городнов А.Г., Козярук А.Е и др. В зарубежной литературе в данной области известны работы авторов: Ortega A., Milano F., Xiaodong L., Omid G., Wilsun X., Jorge Andres Prada Mejia, Luis Angel Silva, Julion Andres Peca Flyrez и др. Основной акцент в данных работах ставится на повышение энергетической эффективности ЭТК и КПД ее отдельных элементов: коррекции коэффициента мощности, фильтрации гармоник, модернизации кабельной системы, снижении удельного расхода топлива для автономных систем электроснабжения и т.д. Несмотря на обширность научных работ и публикаций по данной тематике, основные исследования и предлагаемые методы повышения эффективности ЭТК направлены на решение задач для объектов нефтедобычи и переработки.

Одновременно с этим в газовой промышленности задачи, связанные с повышением эффективности ЭТК, которые отличны от объектов нефтяной промышленности и имеют особенности функционирования, как для централизованной, так и для автономной системы электроснабжения (СЭС), проработаны недостаточно. Таким образом, повышение эффективности ЭТК газового промысла (ГП) при питании от двух независимых источников электроэнергии является актуальной задачей, решить которую можно за счет разработки новых способов и алгоритмов эффективного управления и функционирования ЭТК, способствующих экономии топливно-энергетических ресурсов и повышению эффективности работы основного оборудования установки комплексной подготовки газа (УКПГ) и дожимной компрессорной станции (ДКС) ГП.

**Объект исследования.** Электротехнический комплекс газового промысла №1 Ямбургского нефтегазоконденсатного месторождения (ЯНГКМ) ООО «Газпром добыча Ямбург» с централизованной и автономной системой электроснабжения.

**Предмет исследования.** Методы повышения эффективности электротехнического комплекса газового промысла.

**Цель диссертационной работы.** Повышение эффективности электротехнического комплекса газового промысла при питании от двух независимых источников электроэнергии: централизованного и автономного от дизельных электростанций.

Для достижения цели в диссертационной работе необходимо решить следующие **задачи:**

1. Провести анализ структуры, оценку технико-энергетических параметров и эффективности работы электротехнического комплекса газового промысла №1 ООО «Газпром добыча Ямбург» с централизованной и автономной системой электроснабжения как объекта исследования.

2. Разработать компьютерную модель для электротехнического комплекса газового промысла на основе расчетно-экспериментальных

данных его отдельных элементов в программном комплексе MATLAB/SIMULINK с целью исследования динамических режимов работы электроприводов исполнительных механизмов, энергетических и электромеханических характеристик электротехнического комплекса при использовании предлагаемых решений по повышению эффективности работы основного оборудования газового промысла.

3. Провести расчетно-экспериментальное определение времени пуска асинхронного двигателя (АД) аппарата воздушного охлаждения газа (АВО) со стеклопластиковым рабочим колесом типа ГАЦ-50-4М2 на валу с прямой системой пуска с целью: 1) повысить достоверность компьютерной модели с реальным объектом; 2) определить на компьютерной модели границу перегрузочной способности источника электроэнергии при запуске группы электродвигателей вентиляторов за наименьший промежуток времени в автоматическом режиме запуска.

4. Разработать систему автоматического управления (САУ) аппаратами воздушного охлаждения природного газа типа 2АВГ-75С, обеспечивающую повышение эффективности работы в нормальных и аварийных условиях эксплуатации.

5. Разработать методические рекомендации по повышению эффективности работы электротехнического комплекса газового промысла с централизованной и автономной системой электроснабжения по результатам исследования и предлагаемых решений на компьютерных моделях.

#### **Научные задачи диссертации.**

1. Разработка научных основ повышения эффективности электротехнического комплекса газодобывающего предприятия.

2. Совершенствование функционирования основного оборудования газового промысла в нормальных и аварийных условиях эксплуатации.

**Методы исследования.** Представленные в диссертационной работе научные положения получены с использованием теоретических и расчетно-экспериментальных исследований. Решение поставленных задач

осуществлялось в соответствии с положениями теоретических основ электротехники и электрических машин, теории автоматического управления, аналитических и численных методов прикладной математики, методов современного компьютерного моделирования (MATLAB/SIMULINK).

#### **Достоверность и обоснованность полученных результатов.**

Подтверждается корректным применением апробированных методов компьютерного моделирования электротехнических комплексов, сбором и обработкой экспериментальных данных с помощью средств визуального контроля и записи электрических величин, обработкой актуальной информации об энергетических и электромеханических характеристиках основного электрооборудования газового промысла №1 Ямбургского нефтегазоконденсатного месторождения ООО «Газпром добыча Ямбург».

#### **Научная новизна:**

1. Впервые на основе экспериментальных данных получены зависимости кривых свободного выбега, определены времятоковые, разгонные характеристики и приведенный момент инерции (ПМИ) для АД серий ВАСО16-14-24, ВАСО4-37-24 со стеклопластиковым рабочим колесом типа ГАЦ-50-4М2 на валу.

2. Разработана трехступенчатая защита от гидратообразования в трубках теплообменного аппарата воздушного охлаждения газа типа 2АВГ-75С, которая включает в себя строгий алгоритм включения вентиляторов, жалюзи и реверс вентиляторов в секциях АВО.

3. Разработан алгоритм последовательного включения группы вентиляторов АВО газа без перегрузки источника электроэнергии в автоматическом режиме пуска, который позволит обеспечить восстановление технологического процесса за наименьший промежуток времени по сравнению с ручным режимом запуска группы вентиляторов.

4. Разработаны алгоритмы для систем пуска и функциональные силовые схемы работы вентиляторов АВО газа с использованием

преобразователей частоты (ПЧ) и систем плавного пуска (СПП) по схемам: «один ПЧ (СПП) – один вентилятор», «один ПЧ (СПП) – группа вентиляторов», «комбинированный (СПП+ПЧ)» (патент РФ на изобретение №2807138).

5. Установлено, что при объединение нескольких дизельных электростанций (ДЭС) в единый центр генерации увеличивается коэффициент загрузки, что позволяет увеличить ресурс работы двигателей электростанций и сократить расход дизельного топлива по сравнению с действующей системой автономного электроснабжения электротехнического комплекса газового промысла.

**Теоретическая значимость работы** заключается в совершенствовании алгоритмов управления электроприводами вентиляторов и исполнительных механизмов газового промысла в нормальных и аварийных условиях эксплуатации.

**Практическая значимость работы** определяется разработкой методических рекомендаций по повышению эффективности электротехнического комплекса при питании от централизованной и автономной системы электроснабжения, которые позволяют снизить топливно-энергетические затраты и повысить эффективность работы основного оборудования УКПГ и ДКС газового промысла.

#### **Основные положения, выносимые на защиту.**

1. Компьютерная модель электротехнического комплекса, отличающаяся высокой степенью достоверности с реальным объектом на основе расчетно-экспериментальных данных асинхронного двигателя серии ВАСО16-14-24 (ВАСО4-37-24) со стеклопластиковыми рабочими колесами (вентиляторами) типа ГАЦ-50-4М2 на валу в программном комплексе MATLAB/SIMULINK.

2. Разработанный алгоритм трехступенчатой защиты от гидратообразования в трубках теплообменного аппарата воздушного охлаждения газа типа 2АВГ-75С.

3. Разработанный алгоритм автоматического группового запуска вентиляторов АВО газа без перегрузки источника электроэнергии в автоматическом режиме пуска.

4. Разработанный алгоритм управления и функциональные силовые схемы для систем пуска с использованием преобразователей частоты, систем плавного пуска по схемам: «один ПЧ (СПП) – один вентилятор», «один ПЧ (СПП) – группа вентиляторов», «комбинированный (СПП+ПЧ)».

5. Методические рекомендации по совершенствованию эффективности работы электротехнического комплекса с централизованной и автономной системой электроснабжения.

**Апробация работы.** Основные положения проведенных исследований и результаты работы докладывались на второй международной научной конференции «Приоритетные направления инновационной деятельности в промышленности» (г. Казань, 28.02.2021 г.), на международной научно-практической конференции «Science and technology research 2022» (г. Петрозаводск, 19.04.2022 г.), на VI всероссийской научно-технической конференции «Современные проблемы энергетики и пути их решения» (г. Махачкала, 15-16 декабря 2021 года), на национальной (с международным участием) научно-практической конференции «Современные цифровые технологии: проблемы, решения, перспективы» (Казанский государственный энергетический университет, 19–20 мая 2022 года), на 12-ой научно-практической конференции «Молодые ученые и специалисты ООО «Газпром добыча Надым» (г. Надым, 9-10 ноября 2023г.), на V-ой арктической совместной научно-практической конференции «ООО «Газпром добыча Уренгой» и ООО «Газпром добыча Ямбург» (г. Новый Уренгой, 14-18 мая 2024 г.).

**Публикации.** Основные результаты диссертационной работы опубликованы в 11 печатных работах, в том числе: 3 статьи в периодических изданиях, рекомендованных ВАК, имеется один патент РФ на изобретение.

**Структура и объем диссертационной работы.** Диссертация состоит

из введения, 4 глав, заключения, списка использованной литературы и приложений. Работа изложена на 173 страницах, содержит 75 рисунков, 46 таблиц, 9 приложений. Список использованной литературы включает 109 наименований.

**Личный вклад** заключается в постановке и реализации поставленных задач; научно-техническом обосновании целесообразности комплекса мероприятий по повышению эффективности функционирования электротехнического комплекса газового промысла; анализе результатов; апробации; в проведении экспериментальных исследований с тихоходными АД серии ВАСО4-37-24, ВАСО16-14-24 с композитным стеклопластиковым рабочим колесом типа ГАЦ-50-4М2 на валу; опубликование и использование результатов исследования в качестве объекта патентного права на газовом промысле №1 ЯНГКМ ООО «Газпром добыча Ямбург».

**Соответствие диссертации паспорту специальности.**

По направлению исследования диссертационная работа соответствует пп.1,3,4 паспорта специальности 2.4.2. – «Электротехнические комплексы и системы».

# ГЛАВА I. АНАЛИЗ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА ГАЗОВОГО ПРОМЫСЛА №1 ООО «ГАЗПРОМ ДОБЫЧА ЯМБУРГ» КАК ОБЪЕКТА ИССЛЕДОВАНИЯ

## Постановка задачи

Исследования в области повышения эффективности ЭТК промышленных предприятий связаны с задачами по усовершенствованию и оптимизации, повышению энергетической эффективности ЭТК и КПД ее отдельных элементов: коррекции коэффициента мощности, фильтрации гармоник, модернизации кабельной системы, снижению удельного расхода топлива для автономных систем электроснабжения и т.д. Проблематике повышения эффективности ЭТК посвящены работы отечественных [1-5] и зарубежных авторов [6-14]. Следует отметить, что эти задачи являются нетривиальными, многосвязными, требующими комплексного подхода к их изучению, что является актуальным научно-техническим направлением. Особенно остро задачи повышения энергоэффективности ЭТК ставятся перед объектами добычи, транспорта и переработки нефти и газа, где для питания потребителей электроэнергии нефтегазовых производств используются централизованные и автономные системы электроснабжения на базе ДЭС, газопоршневых или газотурбинных агрегатов. Автономные источники находят все большее применение в системах промышленного электроснабжения в качестве основных, резервных или аварийных источников и, как правило, ограничены по мощности и перегрузочной способности, что делает такие системы чувствительными к току нагрузки, который не должен превышать максимальный ток генерации установки. Их функционирование имеет особенности, влияющие на работу ЭТК [15-18].

Анализ литературных источников [19-21] показывает, что методы

исследования и повышения энергоэффективности ЭТК успешно применяются для объектов нефтедобычи и переработки. В то же время вопрос изучения и анализа ЭТК в газовой промышленности проработан недостаточно. Таким образом, в данной главе рассматривается задача изучения ЭТК ГП №1 ООО «Газпром добыча Ямбург» с централизованной и автономной СЭС как объекта исследования.

## 1.1. Описание газового промысла №1 ООО «Газпром добыча Ямбург»

### 1.1.1. Общая характеристика технологических установок ГП №1

ГП №1 ООО «Газпром добыча Ямбург» входит в состав установок комплексной подготовки газа сеноманской залежи ЯНГКМ и расположен в юго-западной части Ямбургского месторождения на территории Надымского района Ямало-Ненецкого автономного округа (рисунок 1.1).



Рисунок 1.1 – Нефтегазоконденсатные месторождения ПАО «Газпром» в ЯНАО

УКПГ ГП №1 введена в эксплуатацию в июне 1987 года и предназначена для приема собранного природного газа, поступающего по газопроводам-шлейфам от кустов газовых скважин. В 2002 г. введена в эксплуатацию установка предварительной подготовки газа (УППГ) №8 на Харвутинской площади ЯНГКМ, которая предназначена для сбора пластовой смеси от кустов скважин и предварительной сепарации ее с целью обеспечения транспорта по подземным газопроводам до площадки УКПГ ГП №1. На УКПГ производится очистка газа от механических примесей и капельной жидкости. Осушка от влаги производится для предотвращения образования гидратных пробок в магистральных газопроводах при дальнейшем транспорте по газопроводной системе. Подготовка газа на УКПГ включает в себя сбор газа от кустов скважин, гликолевую осушку, охлаждение газа на аппаратах воздушного охлаждения, регенерацию диэтиленгликоля (ДЭГа) и метанола.

В состав УКПГ ГП №1 (рисунок А.1) входят следующие основные объекты и узлы:

1) пункт переключающей арматуры - подключение шлейфов к установке комплексной подготовки газа и распределение ингибитора гидратообразования (метанола) на кусты газовых скважин;

2) технологический цех подготовки газа - подготовка газа в соответствии с ОСТ 51.40-93 (с изм. 2000 г.);

3) установка АВО газа - охлаждение газа перед подачей его в магистральный газопровод;

4) комплектная трансформаторная подстанция (КТП) АВО газа - электроснабжение АВО газа;

5) технологический цех регенерации ДЭГа и метанола - восстановление концентрации осушителя;

6) пункт редуцирования газа на собственные нужды - снижение давления осушенного газа для нужд потребителей газа низкого давления;

7) компрессорная воздуха контрольно-измерительных приборов и автоматики (КИПиА) - подготовка воздуха требуемого давления для управления средствами КИПиА;

8) установка воздухохранилищ - создание запаса воздуха КИПиА;

9) установка отключающих кранов - отключение УКПГ от межпромыслового коллектора;

10) установка подогрева теплоносителя (УПТ) - теплоснабжение промышленных и вспомогательных объектов ГП №1;

11) водоносная станция - обеспечение бесперебойного водоснабжения промышленных сооружений ГП №1 и резервуары запаса воды (РВС) - обеспечивающая хранение необходимого объема воды на хозяйственно-питьевые, производственные и противопожарные нужды;

12) склад горюче-смазочных материалов (ГСМ), ДЭГа и метанола - хранение и пополнение запасов реагентов;

13) система внутриплощадочных коллекторов - транспорт газа, реагентов, стоков и дренажей, пара в системах УКПГ;

14) система сброса газа на свечу;

15) горизонтальное факельное устройство - установка термического обезвреживания промышленных стоков;

16) аварийная ДЭС - аварийное электроснабжение УКПГ;

17) закрытое распределительное устройство (ЗРУ) - прием и распределение электроэнергии на напряжение 6 кВ;

18) блок подсобно-производственных помещений;

19) блок вспомогательных помещений.

По принятой схеме, природный газ от кустов скважин и установки предварительной подготовки газа УППГ №8 Харвутинской площади ЯНГКМ по газопроводам-шлейфам подается на УКПГ ГП №1, где через узлы входа шлейфов в пункт переключающей арматуры и через систему коллекторов поступает на узел очистки газа (УОГ) на ДКС. На ДКС осуществляется очистка газа от механических примесей и капельной жидкости (в УОГ),

сжатие и охлаждение сжатого газа на АВО газа. После ДКС газ с давлением 3,6...4,8 МПа поступает на установку на УКПГ ГП №1.

Подготовка газа осуществляется способом гликолевой осушки в абсорберах с последующим охлаждением до необходимой температуры (-2...+ 10 °С) с помощью АВО сухого газа в зимнее время и турбодетандеров типа БТДА 10-13 со сменными проточными частями типа АДКГ 7.01 производительностью 7 млн. м<sup>3</sup>/сут. (летний режим) каждый. Осушенный и охлажденный газ подается в подземные промысловые коллектора к головной компрессорной станции Ямбургская, а затем - в системы магистральных газопроводов. Для поддержания требуемого технологического режима, в условиях постоянно снижающегося устьевого давления, на УКПГ ГП №1 в 1995 году введена в эксплуатацию ДКС первой очереди, затем в 2001 ДКС второй очереди.

### 1.1.2. Описание ДКС

Дожимная компрессорная станция расположена перед установкой осушки газа и предназначена для сжатия газа, поступающего из скважин на УКПГ, при падении давления газа на входе ниже 7,5 МПа. Технологической схемой ДКС предусматривается сжатия газа до давления, необходимого для обеспечения технологического режима осушки и охлаждения осушенного газа в зимний период - в АВО, в летний период - в турбодетандерных агрегатах (ТДА) и АВО, поддержания проектных отборов газа, а также необходимого давления перед компрессорной станцией Ямбургская. Необходимая степень сжатия на ДКС обеспечивается применением набора сменно-проточной части в обоих компрессорных цехах (КЦ).

В состав ДКС (рисунок Б.1) входят следующие основные объекты:

I. общестанционные:

1) узел подключения ДКС к УКПГ;

- 2) установка очистки пластового газа;
- 3) склад масел с насосной;
- 4) производственно-эксплуатационный блок;
- 5) объекты связи, электрохимзащиты, энерго-, водоснабжения и канализации.

II. КЦ-2 (первая ступень компримирования):

- 1) компрессорный цех;
- 2) установка охлаждения газа (промежуточное охлаждение);
- 3) установка подготовки топливного и пускового газа;
- 4) маслохозяйство КЦ.

III. КЦ-1 (вторая ступень компримирования):

- 1) компрессорный цех;
- 2) установка охлаждения газа (конечное охлаждение);
- 3) установка подготовки топливного и импульсного газов;
- 4) маслохозяйство КЦ;
- 5) резервная ДЭС;
- 6) здание для хранения резервных двигателей.

IV. Вспомогательные объекты ДКС приняты с учетом максимального использования объектов УКПГ:

- 1) воздушной компрессорной;
- 2) склад метанола с насосной;
- 3) подстанции 110/35/6 кВ;
- 4) ЗРУ 6 кВ;
- 5) резервуаров запаса воды и насосной;
- 6) УПТ.

V. Промышленная эксплуатация ДКС первой очереди осуществляется с 1995 г., после ввода КЦ-1. С марта 2003 г. сжатие газа осуществляется в две ступени (КЦ-1 и КЦ-2):

1) первая ступень компримирования (КЦ-2) - установлены 6 агрегатов типа ГПА-Ц5-16С/30-3,0 (рисунок В.1) с СПЧ 295ГЦ2-560/10-30, конечное давление до 3,0 МПа, расчетное - 7,5 МПа;

2) вторая ступень компримирования (КЦ-1) - установлены 5 агрегатов типа ГПУ-16 (рисунок Г.1) с СПЧ 16/76-2,0, конечное давление до 4,8 МПа, расчетное - 7,5 МПа.

## **1.2. Централизованная система электроснабжения УКПГ и ДКС**

### **1.2.1. Общее описание**

Электроснабжение промыслов ЯНГКМ (рисунок Д.1) выполнено от электростанции собственных нужд (ЭСН) ГТЭС-72, расположенной на территории промбазы, и Северных электрических сетей ОАО «Тюменьэнерго» через подстанцию «Ямбург-110/10». Генерирующие мощности ЭСН работают параллельно с энергосистемой. Присоединение района Ямбурга к энергосистеме выполнено по двум воздушным линиям (ВЛ) ВЛ-220 кВ подстанции (ПС) «Оленья» - ПС «Ямбург 110/10», включенным на напряжение 110 кВ. Для распределения электроэнергии по месторождению используются ВЛ-110 кВ на одноцепных опорах и двухтрансформаторные ПС-110/35/6 кВ и ПС-110/6 кВ «глубокого ввода».

Комплекс ГП №1 включает УКПГ и два цеха ДКС (КЦ-1 и КЦ-2), где потребители получают питание от расположенной на территории ГП №1 подстанции 35/6 кВ с двумя трансформаторами мощностью по 25 МВА и двумя взаимно резервируемыми секциями шин (СШ) ЗРУ 6 кВ. Для питания потребителей на площадках в центрах нагрузок установлены масляные двухтрансформаторные КТП напряжением 6/0,4 кВ (рисунок Е.1). Учет электроэнергии на УКПГ и ДКС осуществляется только в ЗРУ 6 кВ электромеханическими счетчиками на вводных и линейных ячейках.

Автоматизированная система контроля и учета электроэнергии (АСКУЭ) на стороне 0,4 кВ отсутствует.

Основными электропотребителями на промысле являются тихоходные и средней быстроходности асинхронные электродвигатели технологических, вентиляционных и сантехнических механизмов малой и средней мощности напряжением 380В, а также наружное и внутреннее освещение площадок и цехов промысла. Общие сведения об основных электродвигателях различной мощности представлены в таблицах 1.1-1.3. Общее количество всех электродвигателей на промысле согласно графику планово-предупредительных ремонтов составляет 918 штук. Пуск электродвигателей – прямой, некоторые электродвигатели оснащены преобразователями частоты. Освещение цехов осуществляется через преобразователь переменного тока серии ППТТ-160-220 УХЛ4. На ДКС установлена система постоянного тока напряжением 220 В, которая включает аккумуляторные батареи 6 OPzS 600, зарядно-подзарядные агрегаты (2хВАЗП-380/260-40/80 УХЛ4) и щиты постоянного тока. Для организации напряжений 110 В на ДКС применены шкафы ШУОТ2403 и имеющие в своем составе аккумуляторы и подзарядные выпрямители. Аккумуляторные батареи всех напряжений работают в режиме постоянного подзаряда и обеспечивают потребителей электроэнергией в течение не менее 30 минут при отключении источников переменного тока. Для формирования бесперебойного питания напряжением ~380/220 В и ~220 В применены агрегаты бесперебойного питания типа АБП-16 на площадках УКПГ и АБП-6,3 на площадке ДКС.

Технологические установки и помещения на УКПГ и ДКС относятся к взрывоопасным помещениям. В производственных помещениях предусмотрено два вида электроосвещения – рабочее и аварийное. Питание аварийного освещения контейнеров в операторной, газоперекачивающих агрегатов (ГПА), операторских УКПГ и ДКС резервировано аккумуляторными батареями 220 В.

Оборудование автоматизированной системы (АСУ) УКПГ

обеспечивается основным (~220 В) и гарантированным (~220 В) питанием от распределительных устройств и источников площадки. Оборудование АСУ ДКС требует питания по рабочим вводам (~220В), по резервным (- 220В) постоянного тока. Питание переменным током этих систем выполнено от распределительных устройств (~380/220В) зданий, в которых они расположены. Питание постоянным током – от соответствующих систем.

Таблица 1.1 – Технические характеристики электродвигателей технологических насосов и электростартеров на ГПА

№	Номинальная мощность, кВт	$\cos \varphi$	КПД, %
1	100	0,9	87
2	55	0,9	90
3	45	0,87	92,5
4	30	0,88	90
5	22	0,86	87
6	15	0,84	89
7	11	0,85	88
8	7,5	0,91	87
9	4	0,88	87
10	3	0,81	82

Таблица 1.2 – Технические характеристики электродвигателей вентиляционных установок

№	Номинальная мощность, кВт	$\cos \varphi$	КПД, %
1	55	0,9	90
2	37	0,8	88
3	30	0,8	90
4	22	0,88	89
5	20	0,87	90
6	11	0,73	87
7	4	0,88	87
8	1,5	0,77	77
9	0,75	0,75	74

Таблица 1.3 – Технические характеристики электродвигателей сетевых насосов воды

№	Номинальная мощность, кВт	$\cos \varphi$	КПД, %
1	160	0,78	87
2	90	0,88	90,5
3	30	0,88	89

Для питания потребителей на площадках в центрах нагрузок установлены двухтрансформаторные КТП 6/0,4 кВ (таблица 1.4). Подстанции выполнены на переменном оперативном токе и оборудованы релейными защитами, автоматикой и сигнализацией.

Таблица 1.4 – Общие сведения о трансформаторах УКПГ и ДКС

№	Диспетчерское наименование	Тип трансформатора, напряжение	Мощность, МВА	Кол-во	Приборный учет, АСКУЭ
1	11ТП-1	ТМЗ-1600/6/0,4 кВ	1,6	2	нет
2	11ТП-2		1,6	2	нет
3	11ТП-3		1,6	2	нет
4	11ТП-20		1,6	2	нет
5	11ТП-21	ТМЗ-1000/6/0,4 кВ	1	2	нет
6	11ТП-22		1	2	нет
7	11ТП-23		1	2	нет
8	11ТП-24		1	2	нет

Для питания электропотребителей и управления электроприводами 0,4 кВ предусмотрены низковольтные комплектные устройства (НКУ), которые размещены в помещениях электрощитовых. При небольшом количестве потребителей аналогичное электрооборудование принято в виде

распределителей, сборок автоматических выключателей и магнитных пускателей. Внутриплощадочные сети 6 кВ и 0,4 кВ – кабельные с прокладкой по технологическим и специально сооруженным кабельным эстакадам. Для распределения электрической энергии между КТП и потребителями используются кабельные линии (КЛ) следующих марок: АВВГ, АВБШв, ВБШв, ВВГ, КГ различного сечения и протяженности. КЛ располагаются открыто по эстакадам и галереям внутри цехов и территории [22].

Для минимизации потребления реактивной мощности на ГП используется нерегулируемая индивидуальная компенсация реактивной мощности с помощью конденсаторных установок (КУ), установленных в КТП АВО газа (таблица 1.5).

Таблица 1.5 – Устройства компенсации реактивной мощности ГП

№ КТП	Мощность КУ, квар	Количество КУ	Тип КУ
1	-	-	-
2	36	48	КЭ2-0,38-36-3У3
3	-	-	-
4	-	-	-
5	36	26	КЭ2-0,38-36-3У3
6	36	26	КЭ2-0,38-36-3У3
7	36	20	КЭ2-0,38-36-3У3
8	36	20	КЭ2-0,38-36-3У3

### **1.2.2. Анализ структуры и энергетических характеристик системы электроснабжения и электротехнического комплекса ГП №1**

Для обоснования выбора объекта исследования необходимо рассмотреть структуру, потери электрической мощности в элементах, особенности построения и функционирования СЭС и ЭТК ГП в зависимости от технологического режима, в обеспечении которых участвует множество различных электропотребителей (ЭП) с различными режимами работы и

графиками нагрузок. ЭТК ГП с централизованной системой электроснабжения можно представить в виде структурной динамической схемы: “КТП-1 – УКПП”(ЭТК (1)), “КТП-3 (ЭТК(2)) – установка подключения теплоносителя”, “КТП-2,5,6,7,8 – аппараты воздушного охлаждения газа” (ЭТК (3)), “КТП-4 – ДКС” (ЭТК (4)) (рисунок 1.2).

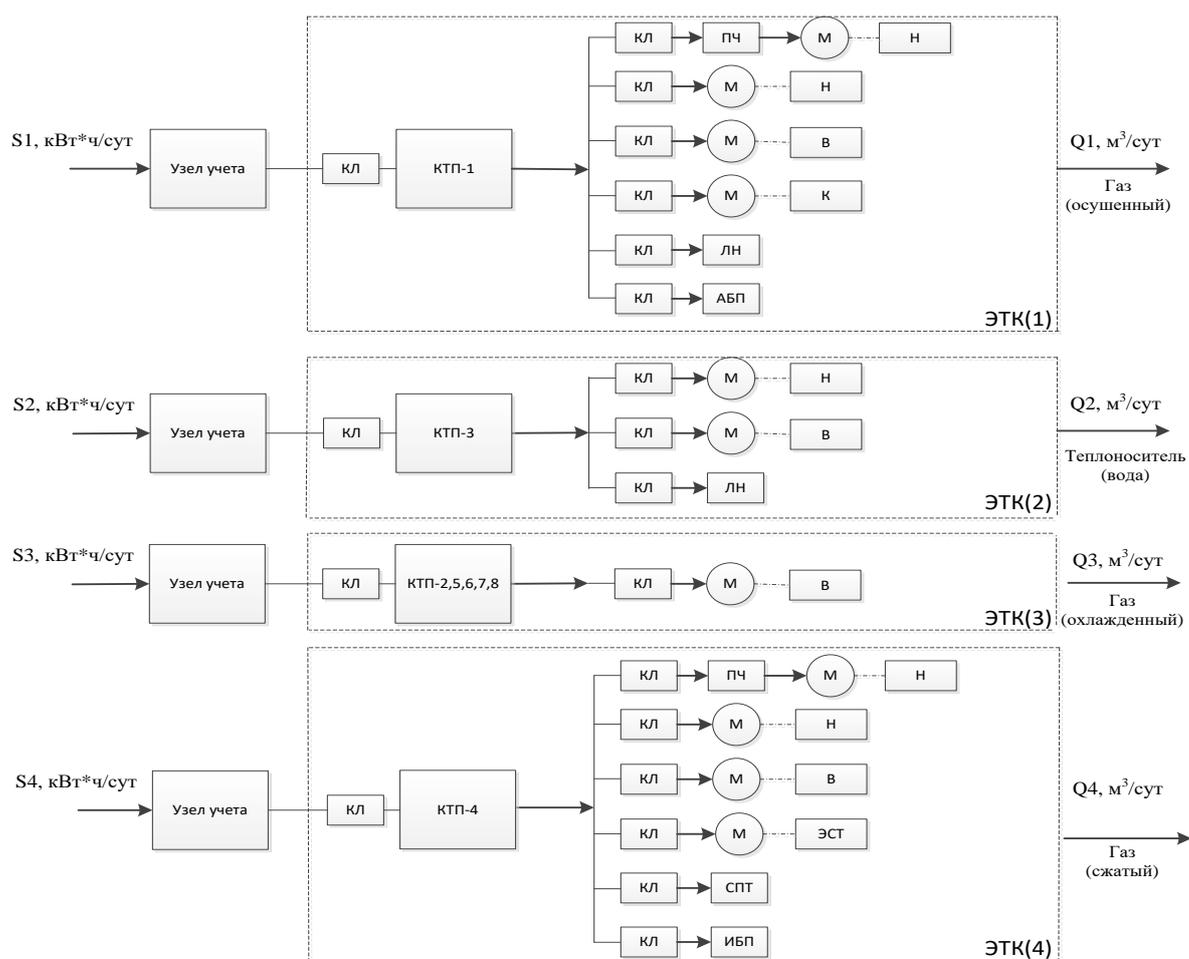


Рисунок 1.2 – Структурная динамическая схема электротехнического комплекса газового промысла с централизованной системой электроснабжения: КЛ – кабельная линия; ПЧ – преобразователь частоты; М – электродвигатель; Н – насос; В – вентилятор; К – компрессор; ЛН – линейная нагрузка; АБП – агрегат бесперебойного питания; ЭСТ – электростартер; СПТ – система постоянного тока; ИБП – источник бесперебойного питания;  $S_1$ - $S_4$  – суточный расход электрической энергии;  $Q_1, Q_3, Q_4$  – суточный объем газа;  $Q_2$  – суточный объем воды

Полная активная мощность каждого КТП состоит из полезной мощности, расходуемой на добычу, подготовку, сжатие, охлаждения природного газа и циркуляцию воды в системе теплоснабжения промысла, и потерь мощности в элементах каждого ЭТК:

$$P_{полн} = P_{полезн} + \Delta P_{кмп}, \quad (1.1)$$

где  $\Delta P_{кмп}$  – потери мощности в элементах ЭТК КТП.

Потери мощности электрической энергии в каждом ЭТК определяются выражениями в соответствии с рисунком 1.2:

$$\begin{aligned} \Delta P_{кмп1} = & \Delta P_{кл.до.тр-ра} + \Delta P_{тр-р} + \Delta P_{кл.н} + \Delta P_{эл} + \Delta P_{н} + \Delta P_{в} + \\ & + \Delta P_{лн} + \Delta P_{абн} + \Delta P_{к} + \Delta P_{нч}, \end{aligned} \quad (1.2)$$

$$\Delta P_{кмп3} = \Delta P_{кл.до.тр-ра} + \Delta P_{тр-р} + \Delta P_{кл.н} + \Delta P_{эл} + \Delta P_{н} + \Delta P_{в} + \Delta P_{лн}, \quad (1.3)$$

$$\Delta P_{кмп3} = \Delta P_{кл.до.тр-ра} + \Delta P_{тр-р} + \Delta P_{кл.н} + \Delta P_{эл} + \Delta P_{в}, \quad (1.4)$$

$$\begin{aligned} \Delta P_{кмп4} = & \Delta P_{кл.до.тр-ра} + \Delta P_{тр-р} + \Delta P_{кл.н} + \Delta P_{эл} + \Delta P_{н} + \Delta P_{в} + \\ & + \Delta P_{убн} + \Delta P_{снт} + \Delta P_{эст} + \Delta P_{нч}, \end{aligned} \quad (1.5)$$

где  $\Delta P_{кл.до.тр-ра}$  – потери активной мощности в КЛ до трансформатора,  $\Delta P_{тр-ра}$  – потери активной мощности трансформатора,  $\Delta P_{кл.н}$  – потери активной мощности в КЛ нагрузки,  $\Delta P_{эл}$  – потери активной мощности в электродвигателе,  $\Delta P_{н}$  – потери в насосе,  $\Delta P_{в}$  – потери в вентиляторе,  $\Delta P_{лн}$  – потери активной мощности в линейной нагрузке,  $\Delta P_{абн}$  – потери активной мощности в АБП,  $\Delta P_{к}$  – потери активной мощности в компрессоре,

$\Delta P_{пч}$  – потери активной мощности в ПЧ,  $\Delta P_{ибп}$  – потери активной мощности в ИБП,  $\Delta P_{спт}$  – потери активной мощности в СПТ,  $\Delta P_{эст}$  – потери активной мощности в электростартере.

Для оценки энергетических параметров системы электроснабжения и ЭТК ГП был приведен результаты потребления электроэнергии газовыми промыслами за расчетный период, который показал, что ГП №1 занимает 4-е место по годовому потреблению электрической энергии среди 11-ти газовых промыслов и 1-ой линейно-эксплуатационной службы ЯНГКМ (рисунок 1.3). В таблице 1.6 приведены результаты измерения активной мощности на узлах учета электрических сетей 0,4 кВ централизованной системы электроснабжения газовых промыслов и линейно-эксплуатационной службы ЯНГКМ филиала газопромыслового управления (ф. ГПУ). На рисунке 1.4 схематично представлено годовое потребление электрической энергии ГП №1 за 2019 год, где наибольшее потребление электрической энергии происходит в 3-ем квартале, а максимум нагрузки в наиболее жарком месяце для этого климатического пояса - июле.

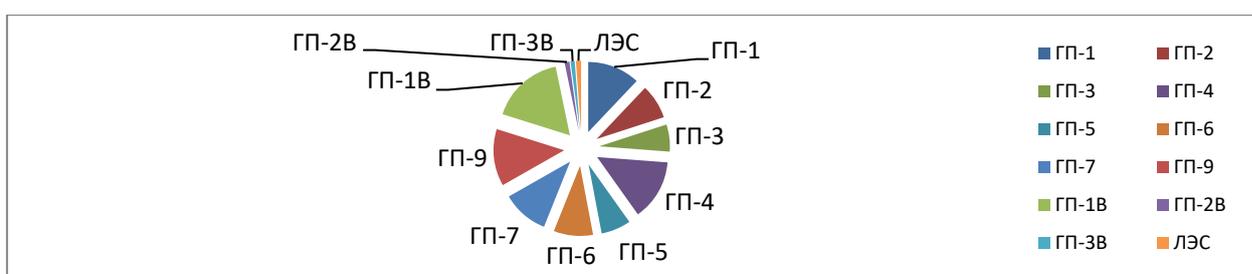


Рисунок 1.3 – Гистограмма потребления электроэнергии газовыми промыслами ф. ГПУ за 12 месяцев 2019 года:

ЛЭС – линейно-эксплуатационная служба

Суммарный годовой расход электроэнергии газовыми промыслами ф. ГПУ в 2019г. составил 156 906 231 кВт·ч, где на ГП №1 приходится 18 841 891 кВт·ч, что составляет 12 % от суммарной потребляемой энергии.

Максимумы нагрузок годового расхода электроэнергии газовыми промыслами (рисунки 1.5-1.6) совпадает с наиболее холодными (1 квартал) и жаркими (3 квартал) месяцами года. Анализ суточных графиков (от 17.12.2019 года) (рисунок 1.7) показывает, что фактическое сетевое потребление электрической энергии лежит в диапазоне 2-2,5 МВт\*ч и зависит от технологии добычи и подготовки газа, режимов работы оборудования, а также на какой стадии жизненного цикла находится месторождение.

Общий график мощности (рис.1.5) потребления электроэнергии газовыми промыслами ф. ГПУ в 2019 г. указывает на идентичный максимум нагрузки преимущественно в летний период. Часть нагрузки в летний период уменьшается за счет промыслов, которые уходят в плановый останов. Максимум нагрузки в летний период связан с температурой окружающего воздуха, которая влияет на физико-химические свойства природного газа при его транспортировке в магистраль на выходе из УКПГ, а также при компримировании на ДКС 1 и 2-ой очереди. Для усиленного охлаждения газа в летний период используются вентиляторы АВО газа, где приводом является АД номинальной мощностью 37 кВт серии ВАСО. Общее количество АД АВО на УКПГ составляет – 48 шт., на ДКС 1-ой очереди – 52 шт., ДКС 2-ой очереди – 40 шт. Аналогичные АД используются в качестве воздушных холодильников в цехе регенерации ДЭГ и метанола в количестве – 12 шт. Пуск электродвигателей осуществляется без использования дополнительных способов пуска (автотрансформаторный, устройства плавного пуска, преобразователь частоты и т.д.).

Таблица 1.6 – Расход электроэнергии (кВт·ч) газовыми промыслами ф. ГПУ в 2019 г.

	январь	февраль	март	апрель	май	июнь	июль	август	сентябрь	октябрь	ноябрь	декабрь	Всего
ГП-1	1 590 753	1 313 316	1 481 451	1 504 094	1 574 105	1 156 148	2 010 528	1 912 734	1 847 135	1 544 157	1 448 027	1 459 443	18 841 891
ГП-2	1 389 096	1 117 112	1 348 470	1 235 447	1 088 722	406 685	346 019	968 048	1 056 487	1 050 842	1 221 108	1 258 148	12 486 184
ГП-3	1 130 534	912 146	1 068 099	993 728	925 962	201 747	108 014	839 565	850 606	823 617	930 659	1 009 796	9 794 473
ГП-4	1 374 347	1 169 369	1 294 798	1 353 385	1 490 862	2 512 469	1 994 450	2 750 409	2 535 932	2 087 473	1 667 647	1 736 958	21 968 099
ГП-5	1 128 435	959 802	1 124 491	1 031 123	955 941	475 014	119 885	967 050	938 809	912 207	1 035 277	1 046 430	10 694 464
ГП-6	1 166 298	969 992	1 103 355	1 097 944	868 278	1 950 488	810 652	1 415 297	1 093 244	1 014 272	1 437 419	1 207 789	14 135 028
ГП-7	1 230 481	1 083 640	1 145 991	1 191 132	1 472 452	1 995 080	2 033 445	1 878 621	1 212 737	1 188 454	1 179 045	1 160 058	16 771 136
ГП-9	1 846 871	1 586 117	1 779 528	1 526 471	1 170 889	1 619 639	1 854 866	1 773 372	1 670 623	1 693 841	1 995 927	2 131 150	20 649 294
ГП-1В	2 486 399	2 212 847	2 369 375	2 272 127	2 320 175	2 229 647	2 220 875	1 208 255	1 949 591	2 453 099	2 351 879	2 418 323	26 492 592
ГП-2В	184 148	169 604	179 707	151 276	144 592	106 216	90 280	96 990	131 248	144 490	167 163	173 274	1 738 988
ГП-3В	161 972	137 122	152 358	125 582	113 369	88 779	82 531	94 004	115 366	128 400	146 035	157 300	1 502 818
ЛЭС	238 799	219 556	240 013	196 490	169 564	90 315	46 897	73 422	73 491	110 913	171 851	199 953	1 831 264
Всего	13 928 133	11 850 623	13 287 636	12 678 799	12 294 911	12 832 227	11 718 442	13 977 767	13 475 269	13 151 765	13 752 037	13 958 622	156 906 231

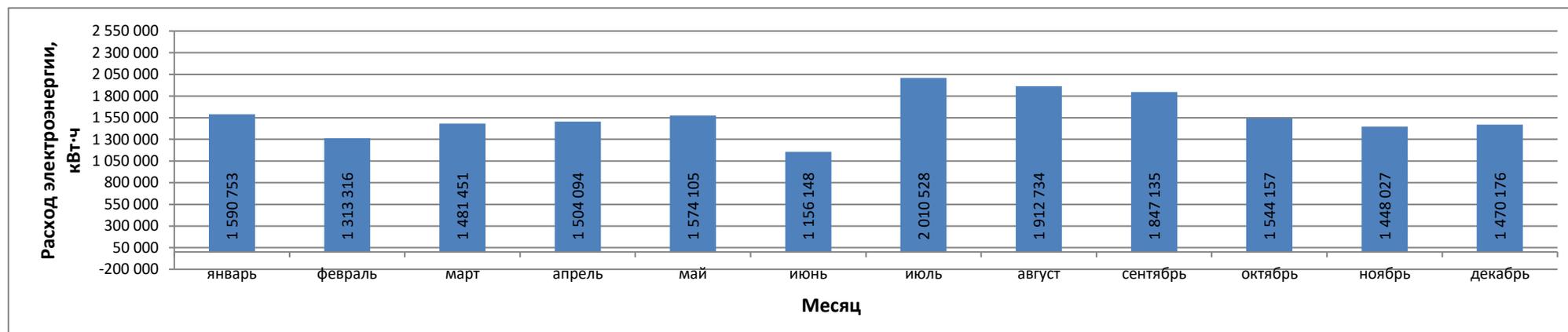


Рисунок 1.4 – Гистограмма помесячного потребления (кВт·ч) электроэнергии ГП №1 в 2019 г.

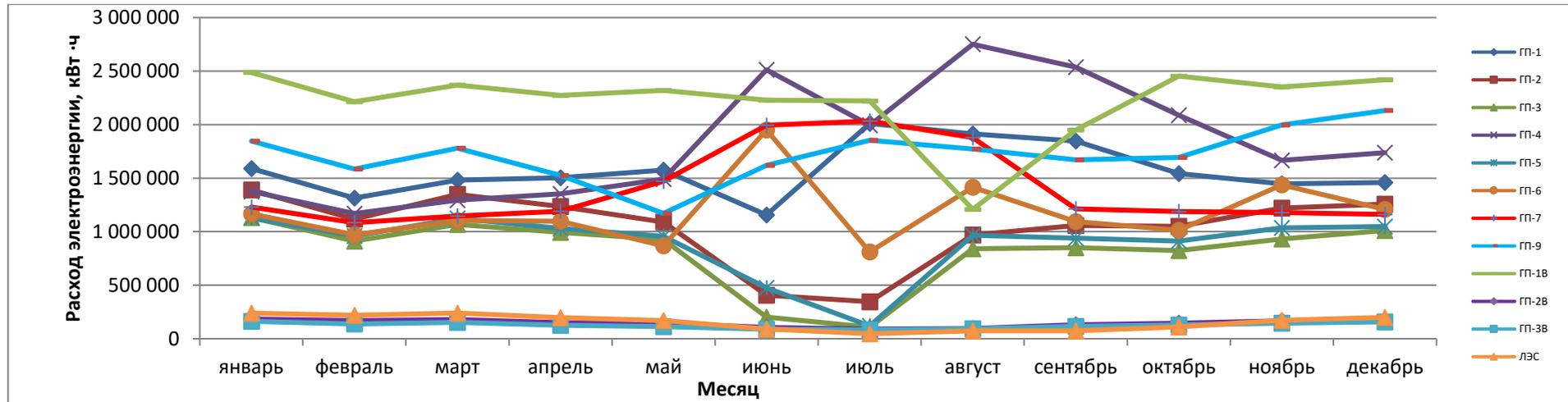


Рисунок 1.5 –Расход электроэнергии (кВт·ч) газовыми промыслами ф. ГПУ в 2019 г.

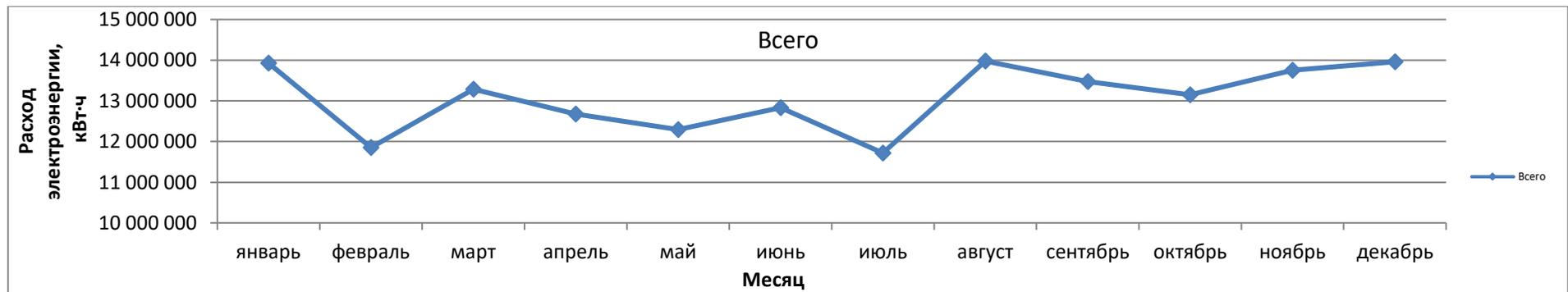


Рисунок 1.6 – Суммарный годовой расход электроэнергии (кВт·ч) газовыми промыслами ф. ГПУ в 2019 г.

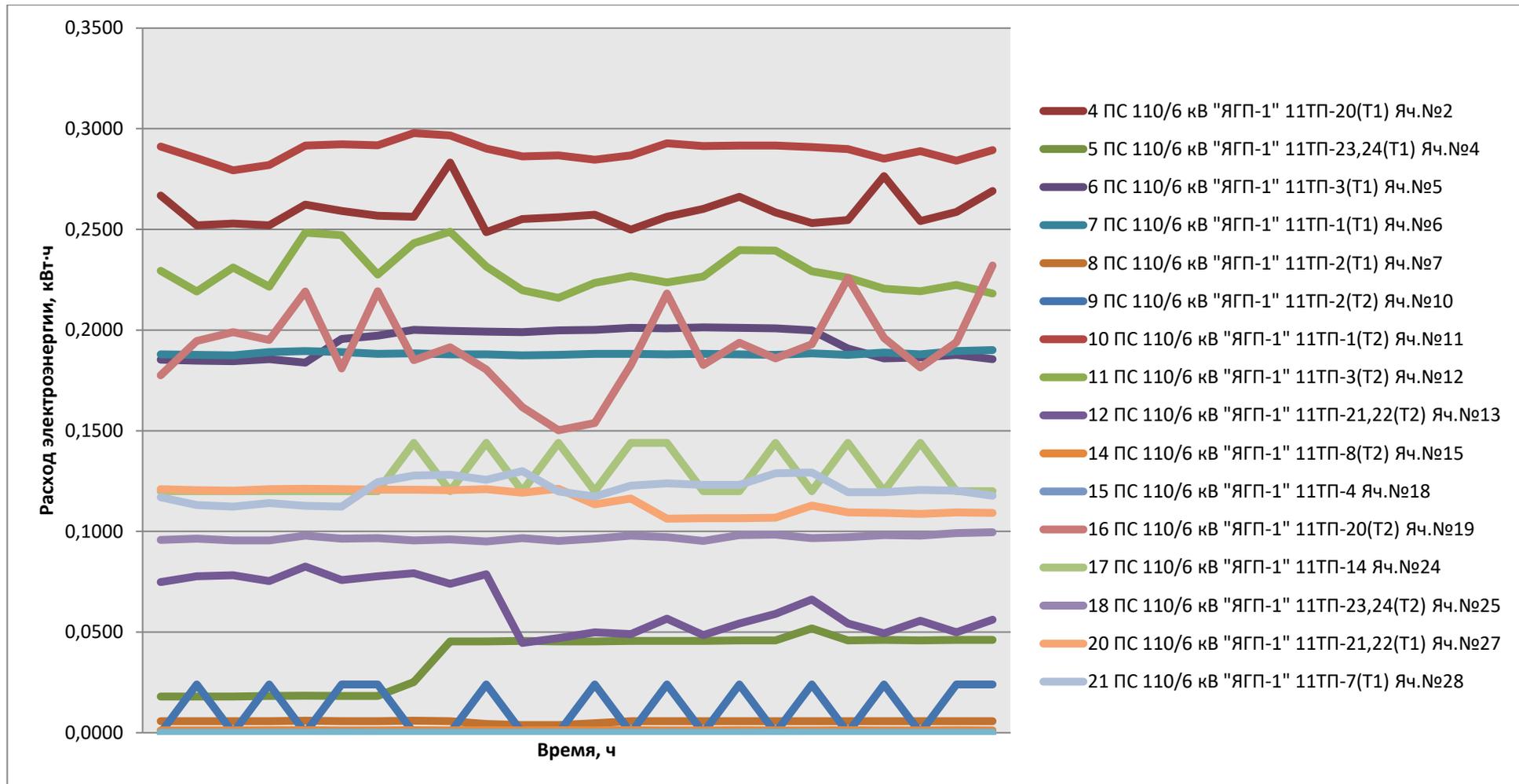


Рисунок 1.7 – Почасовой замер расхода активной мощности (МВт·ч) по вводным ячейкам и ячейкам присоединений потребителей ЗРУ-6 (10) кВ в течение суток (17.12.19 г.)

Энергоэффективность электротехнического комплекса зависит напрямую от удельных затрат электроэнергии на единицу добываемого газа. На рисунке 1.8, показана гистограмма удельных затрат электроэнергии к добыче природного газа ЯНГКМ. Удельные затраты электроэнергии к добыче природного газа на ГП №1 составляют  $3,99 \frac{\text{тыс.кВт}\cdot\text{ч}}{\text{тыс. м}^3}$  (таблица 1.7).

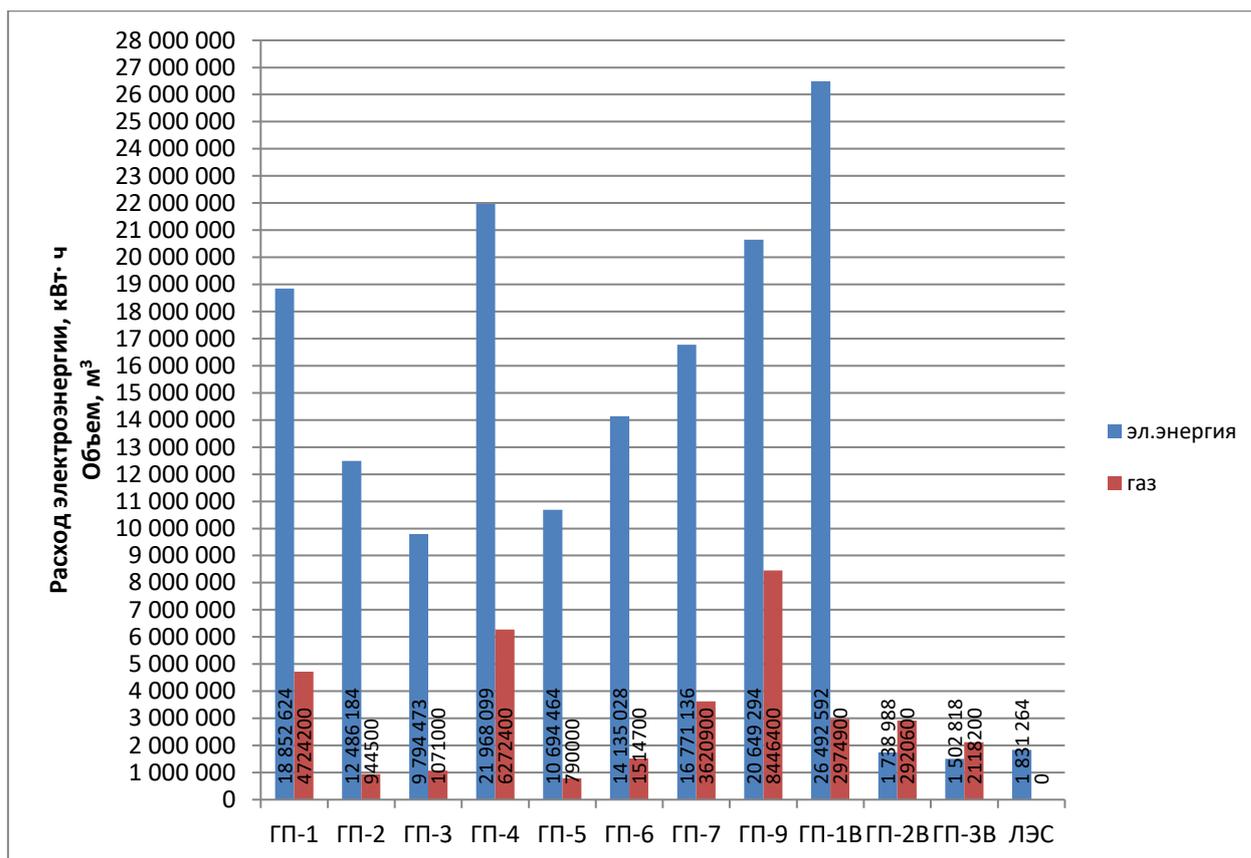


Рисунок 1.8 – Гистограмма затрат электроэнергии (кВт·ч) к добыче природного газа ЯНГКМ

Таблица 1.7 – Удельные затраты электроэнергии к добыче газа ЯНГКМ

Промысел	Эл. Энергия, кВт·ч	Газ (вал), м <sup>3</sup>	Удельный расход тыс. кВт·ч / тыс. м <sup>3</sup>
ГП-1	18 852 624	4724200	3,9906
ГП-2	12 486 184	944500	13,2198

Промысел	Эл. Энергия, кВт·ч	Газ (вал), м <sup>3</sup>	Удельный расход тыс. кВт·ч /тыс. м <sup>3</sup>
ГП-3	9 794 473	1071000	9,1451
ГП-4	21 968 099	6272400	3,5023
ГП-5	10 694 464	790000	13,5372
ГП-6	14 135 028	1514700	9,3318
ГП-7	16 771 136	3620900	4,6317
ГП-9	20 649 294	8446400	2,4447
ГП-1В	26 492 592	2974900	8,9053
ГП-2В	1 738 988	2920600	0,5954
ГП-3В	1 502 818	2118200	0,7094
ЛЭС	1 831 264	"-"	"-"

Показатели и нормы качества электрической энергии регулируются согласно ГОСТ 32144-2013 [23]. В настоящее время на ГП №1 отсутствует информация об этих параметрах, однако имеются показания коэффициентов мощности ( $\cos \varphi$ ) и реактивной мощности ( $\operatorname{tg} \varphi$ ) за 9 часов работы, снятые на узлах учета электрических сетей 6 кВ при энергетическом обследовании [24] на первом и втором вводе (рисунки 1.9-1.10).

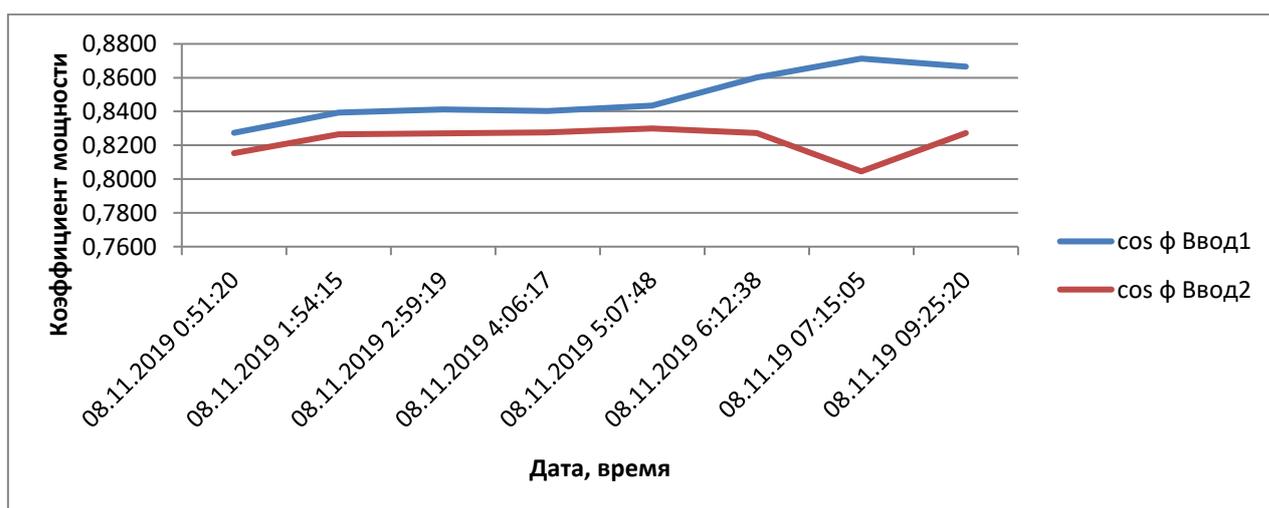


Рисунок 1.9 – Диаграмма коэффициента мощности ( $\cos \varphi$ )

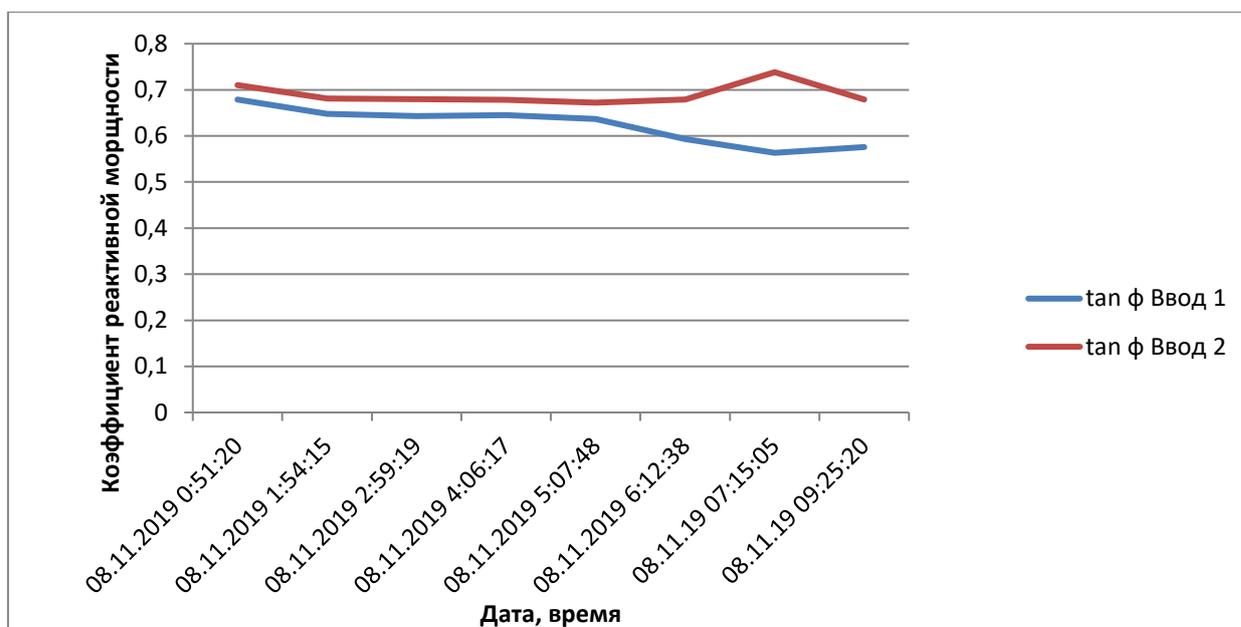


Рисунок 1.10 – Диаграмма коэффициента реактивной мощности ( $\text{tg } \varphi$ )

Гистограмма реактивной мощности ( $\text{tg } \varphi$ ) указывает, что диапазон лежит в пределах 0,58..0,74, что не соответствует максимальному значению коэффициенту реактивной мощности, потребляемой в часы больших суточных нагрузок электрической сети (таблица 1.8), согласно приказу Министерства энергетики РФ от 23 июня 2015 г. N 380 "О Порядке расчета значений соотношения потребления активной и реактивной мощности для отдельных энергопринимающих устройств (групп энергопринимающих устройств) потребителей электрической энергии".

Таблица 1.8 – Максимальное значение коэффициента реактивной мощности

Уровень напряжения	Коэффициент реактивной мощности
	$\text{tg } \varphi$
110 кВ (154 кВ)	0,5
35 кВ (60 кВ)	0,4
1 - 20 кВ	0,4
ниже 1 кВ	0,35

### 1.2.3. Расчет энергетических показателей

Учет электроэнергии на УКПГ и ДКС осуществляется в ЗРУ 6 кВ (рисунок 1.11) по высокой стороне электромеханическими счетчиками на вводных (активная и реактивная мощность) и линейных ячейках (активная мощность).

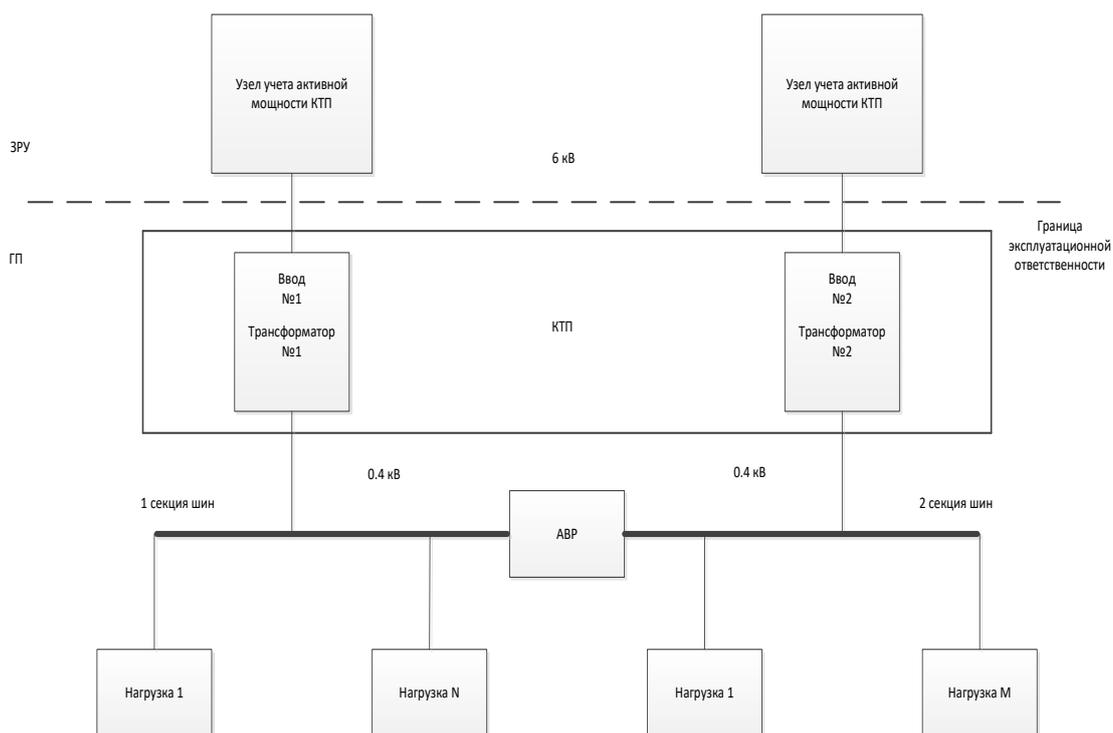


Рисунок 1.11 – Структурная схема электропитания от КТП 6/0,4 кВ:  
 нагрузка 1...N – количество электроприемников на 1 секции шин;  
 нагрузка 1...M – количество электроприемников на 2 секции шин

Для оценки энергетических параметров системы электроснабжения и ЭТК необходимо определить показатели электрических нагрузок (потребляемая активная, реактивная и полная мощность, коэффициенты мощности, коэффициенты реактивной мощности). Изменение электрических нагрузок во времени обусловлено свойствами технологических процессов, в обеспечении которых участвует множество различных ЭП с различными

режимами работы и графиками нагрузок. Для приближенного расчета электрических нагрузок в КТП используются следующие положения [25]:

1) нагрузка рассматриваемой группы ЭП на каждой СШ КТП определяется согласно графикам потребляемой активной электрической мощности (т.к. отсутствует информация о реактивной мощности на каждом присоединении), снятыми электромеханическими счетчиками на линейных ячейках ЗРУ (рисунок 1.12);

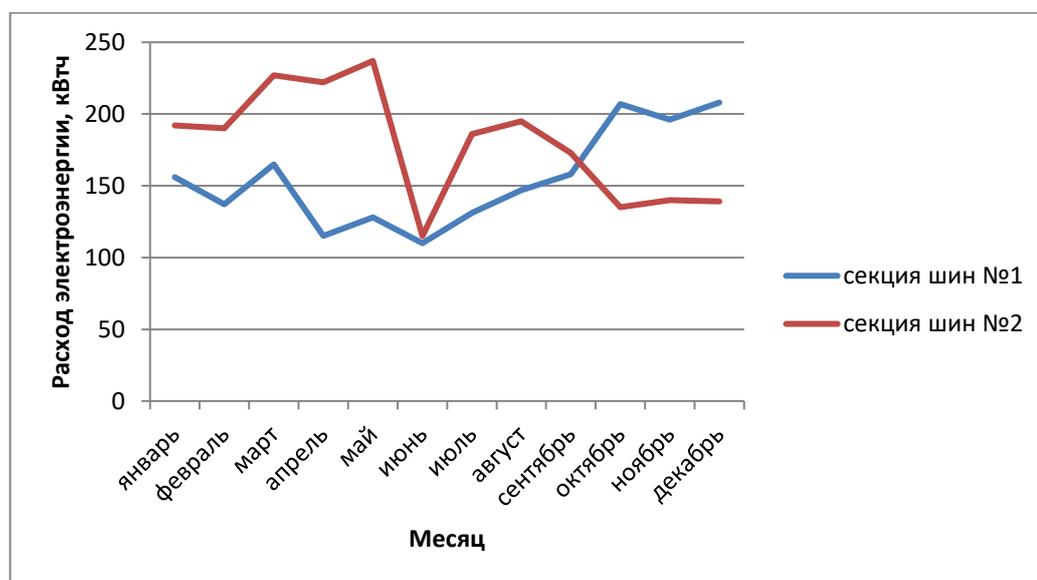


Рисунок 1.12 – Годовой график потребления активной мощности в КТП

2) определяется среднеквадратичная активная нагрузка группы ЭП на каждой секциях шин КТП:

$$P_{cp} = \sqrt{\frac{P_1^2 \cdot t_1 + P_2^2 \cdot t_2 + \dots + P_{12}^2 \cdot t_{12}}{t_1 + t_2 + \dots + t_{12}}}, \quad (1.6)$$

где  $P_1 \dots P_{12}$  – нагрузки за месяц;  $t_1 \dots t_{12}$  – количество часов в месяце при непрерывном режиме работы газового промысла.

Нагрузка за месяц определяется:

$$P_1 \dots P_{12} = \sum_{i=1}^N P_{номi} + \sum_{j=1}^M (P_{пв} \cdot \sqrt{ПВ})_j, \quad (1.7)$$

где  $P_{номi}$  – номинальная мощность ЭП для продолжительного режима работы;  $ПВ$  – продолжительность включения в о. е.,  $P_{пв}$  – мощность ЭП работающего в повторно-кратковременном режиме;  $N$  – количество ЭП работающих в продолжительном режиме;  $M$  – количество ЭП работающих в повторно-кратковременном режиме (таблица 1.9);

Таблица 1.9 – Количество ЭП для продолжительного и повторно-кратковременного режима

№ КТП/№ секции шин	N	M
1/1	59	2
1/2	56	2
2/1	24	0
2/2	24	0
3/1	21	3
3/2	23	3
4/1	126	14
4/2	160	14
5/1	13	0
5/2	13	0
6/1	13	0
6/2	13	0
7/1	10	0
7/2	10	0
8/1	10	0
8/2	10	0

3) определяется средневзвешенный коэффициент мощности и  $\tan \varphi_{с.вз}$  группы ЭП:

$$\cos \varphi_{с.вз.} = \frac{\sum_{n=1}^s P_{номn} \cdot \cos \varphi_n}{\sum_{n=1}^s P_{номn}}, \quad (1.8)$$

где  $\cos\varphi_n$  – коэффициент мощности каждого ЭП на секции шин;  $S$  – общее кол-во ЭП на С.Ш. (таблица 1.9);

$$\tan\varphi_{c.вз.} = \frac{\sqrt{1 - \cos^2\varphi_{c.вз.}}}{\cos\varphi_{c.вз.}}, \quad (1.9)$$

4) определяется коэффициент максимума:

$$k_m = \frac{P_{\max}}{P_{cp}}, \quad (1.10)$$

где  $P_{\max}$  – максимальная нагрузка, которая находится по годовому графику изменения активной мощности КТП (рисунок 1.18);

5) определяются из (1.6), (1.9-1.10), расчетные величины активной, реактивной и полной мощности группы ЭП на каждой секции шин КТП:

$$P_p = k_m \cdot P_{cp} = P_{\max}, \quad (1.11)$$

$$Q_p = P_p \cdot \tan\varphi_{c.вз.} - Q_k, \quad (1.12)$$

$$S_p = \sqrt{P_p^2 + Q_p^2}, \quad (1.13)$$

где  $Q_p$  – реактивная мощность компенсации на каждой секции шин (из таблицы 1.6);

б) определяются расчетный коэффициент мощности и коэффициент реактивной мощности для группы ЭП КТП из (1.11-1.13):

$$\cos\varphi_p = \frac{P_p}{S_p}, \quad (1.14)$$

$$\tan \varphi_p = \frac{Q_p}{P_p} . \quad (1.15)$$

Расчет производится аналогично для КТП (№2-8). Результаты из (1.6), (1.7-1.15) вносятся в таблицу 1.10.

Таблица 1.10 – Энергетические показатели централизованной системы электроснабжения

№ КТП/№ секции шин	Общее кол-во ЭП, шт	Среднемесячная активная нагрузка, кВт	Средневзвешенный коэффициент мощности	Средневзвешенный коэффициент реактивной мощности	Коэффициент максимума	Активная расчетная мощность, кВт	Реактивная расчетная мощность, кВар	Полная расчетная мощность, кВА	Коэффициент расчетной мощности на секции шин КТП	Коэффициент расчетной реактивной мощности
	$S$	$P_{cp}$	$\cos \varphi_{c.B3}$	$\tan \varphi_{c.B3}$	$k_m$	$P_p$	$Q_p$	$S_p$	$\cos \varphi_p$	$\tan \varphi_p$
1/1	61	158,5	0,85	0,62	1,31	208	128,96	244,73	0,849	0,62
1/2	58	183,3	0,88	0,54	1,29	237	127,98	269,34	0,879	0,54
2/1	24	158,8	0,8	0,75	1,78	282	5,72	282,06	0,99	0,02
2/2	24	198,9	0,8	0,75	1,83	364	7,38	364,07	0,99	0,02
3/1	24	107,7	0,79	0,78	1,24	134	104,52	169,94	0,788	0,78
3/2	26	143,3	0,77	0,83	1,19	171	141,93	222,23	0,769	0,83
4/1	140	127,2	0,79	0,78	1,29	165	128,7	209,26	0,788	0,78
4/2	174	121,3	0,81	0,72	1,32	160	115,2	197,16	0,811	0,72
5/1	13	97,2	0,82	0,7	2,05	199	3,76	199,04	0,99	0,019
5/2	13	60,6	0,82	0,7	1,65	100	1,89	100,02	0,99	0,019
6/1	13	97,4	0,8	0,75	1,95	190	3,85	190,04	0,99	0,02
6/2	13	60,5	0,8	0,75	1,98	120	2,43	120,02	0,99	0,02
7/1	10	64,4	0,82	0,7	2,06	133	2,52	133,02	0,99	0,019
7/2	10	50,4	0,82	0,7	1,77	89	1,68	89,02	0,99	0,019
8/1	10	64,4	0,8	0,75	2,17	140	2,84	140,03	0,99	0,02
8/2	10	50,3	0,8	0,75	1,89	95	1,93	95,02	0,99	0,02

### 1.3. Автономная система электроснабжения УКПГ и ДКС

#### 1.3.1. Общее описание

Технологический режим при отключении централизованной СЭС потребителей обеспечивается автономной СЭС от аварийных ДЭС, подключенных к СШ распределительного устройства (РУ) РУ-0,4кВ КТП, системами постоянного тока (напряжением 220 В и 110 В) и системами бесперебойного питания (380/220 В, 50 Гц). Автономная СЭС ГП состоит из ДЭС блочного типа исполнения с различными эксплуатационными и техническими характеристиками, приведенными в таблице 1.11.

Таблица 1.11 – Топливо-энергетические характеристики ДЭС

Тип станции	Мощность, кВт	Удельный расход масла, г/кВт*час	Усредненный расход топлива, л/час	Усредненный расход масла, кг/час
БЭС-630	630	не более – 5,9	130	2,5
КАС-630	630	не более – 2,9	133	1,0 – 1,3
Cummins C900D5	656	не более – 1,9	126	0,5

На ГП №1 установлены четыре ДЭС (рисунок 1.13). Автоматическое включение ДЭС осуществляется при исчезновении напряжения от централизованной СЭС. Ручное включение ДЭС обеспечивает находящийся на смене оперативно-ремонтный персонал при кратковременных перерывах электроснабжения. В дежурном режиме находятся ДЭС №1-3. ДЭС № 4 через обходные кабельные линии резервирует по отдельности ДЭС №2 или №3 в случае аварийного останова (ремонта) одной из дизельных электростанций [26].

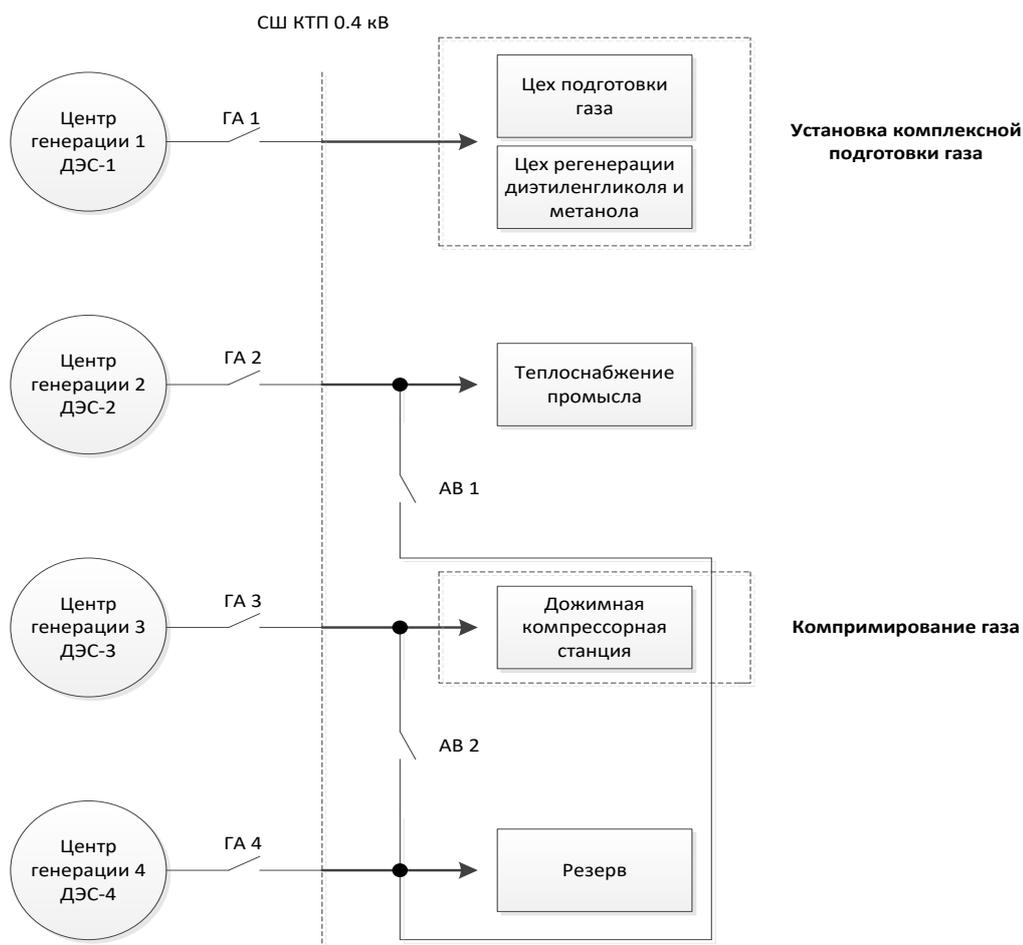


Рисунок 1.13 – Структурная схема автономного электроснабжения:  
 ГА – генераторный автомат; СШ – секция шин; АВ – автоматический  
 ВЫКЛЮЧАТЕЛЬ

### 1.3.2. Анализ структуры и энергетических характеристик системы электроснабжения и электротехнического комплекса ГП №1

ЭТК ГП с автономной СЭС можно представить в виде структурной динамической схемы: “один генератор – УКПГ” (ЭТК-1-1), “один генератор – УПТ” (ЭТК-1-2), “один генератор – ДКС” (ЭТК-1-3), “один генератор – резерв” (рисунок 1.14), где нагрузка на электростанцию осуществляется через резервирование СШ включением автоматического включения резерва (АВР) в КТП [27]. Резервирование ЭТК АВО газа УКПГ и

ДКС с помощью ДЭС не было заложено в техническом задании при проектировании ГП и в настоящее время не осуществляется.

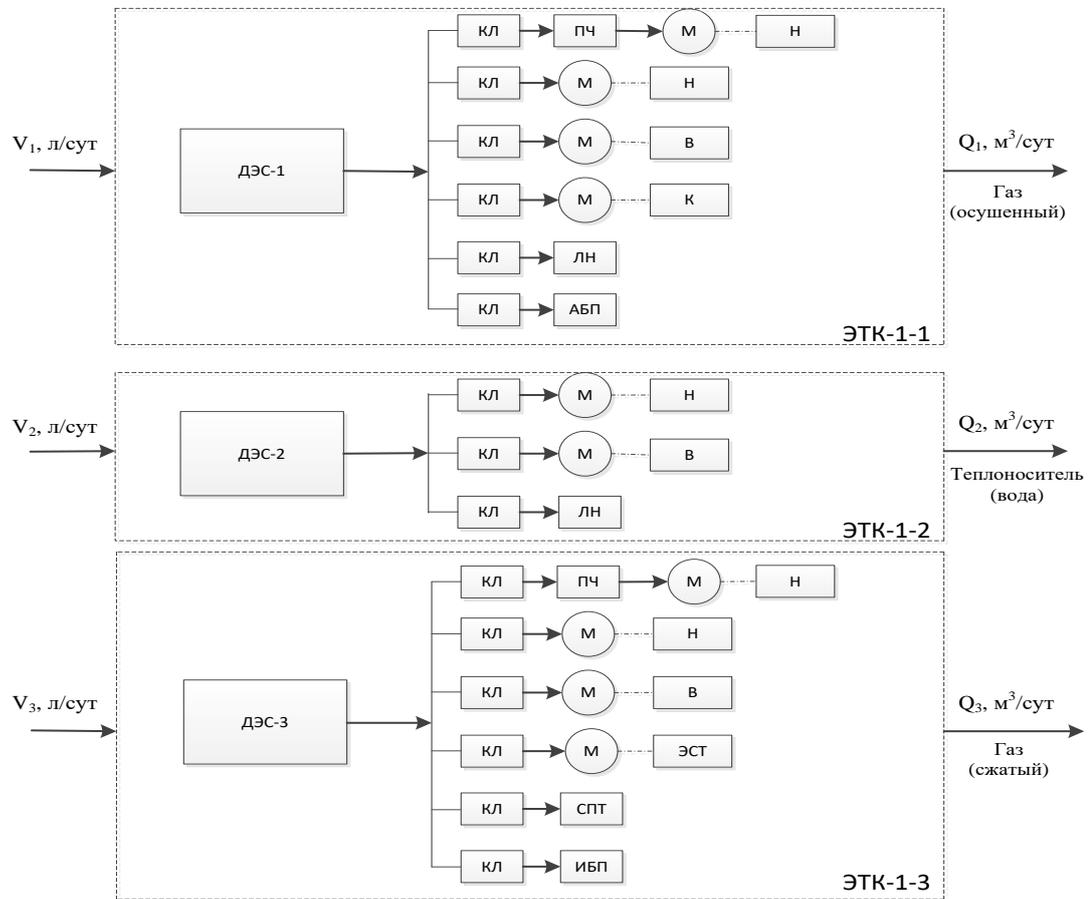


Рисунок 1.14 – Структурная динамическая схема ЭТК ГП с автономной СЭС:

$V_1$ - $V_3$  – суточный расход дизельного топлива;  $Q_1, Q_3$  – суточный объем газа;  $Q_2$  – суточный объем воды; ДЭС-1,2,3 – дизель-генераторные электростанции

Потери активной мощности в каждом ЭТК (ЭТК-1-1, ЭТК-1-2, ЭТК-1-3) определяются выражениями в соответствии с разработанной структурной динамической схемой:

$$\Delta P_1 = \Delta P_{\text{кл.н}} + \Delta P_{\text{эл}} + \Delta P_{\text{н}} + \Delta P_{\text{в}} + \Delta P_{\text{лн}} + \Delta P_{\text{абп}} + \Delta P_{\text{н}} + \Delta P_{\text{пч}}, \quad (1.16)$$

$$\Delta P_2 = \Delta P_{\text{кл.н}} + \Delta P_{\text{эл}} + \Delta P_{\text{н}} + \Delta P_{\text{в}} + \Delta P_{\text{лн}}, \quad (1.17)$$

$$\Delta P_3 = \Delta P_{кл.н} + \Delta P_{эл} + \Delta P_{н} + \Delta P_{в} + \Delta P_{убн} + \Delta P_{снт} + \Delta P_{эст} + \Delta P_{пч}. \quad (1.18)$$

Анализ данных (рисунок 1.15), полученных из оперативной документации за пять лет (2019-2023 год) для автономной системы электроснабжения, показывает, что максимальный годовой расход дизельного топлива среди четырех ДЭС за 2021 год составил 28,113 тонн (ДЭС-2).

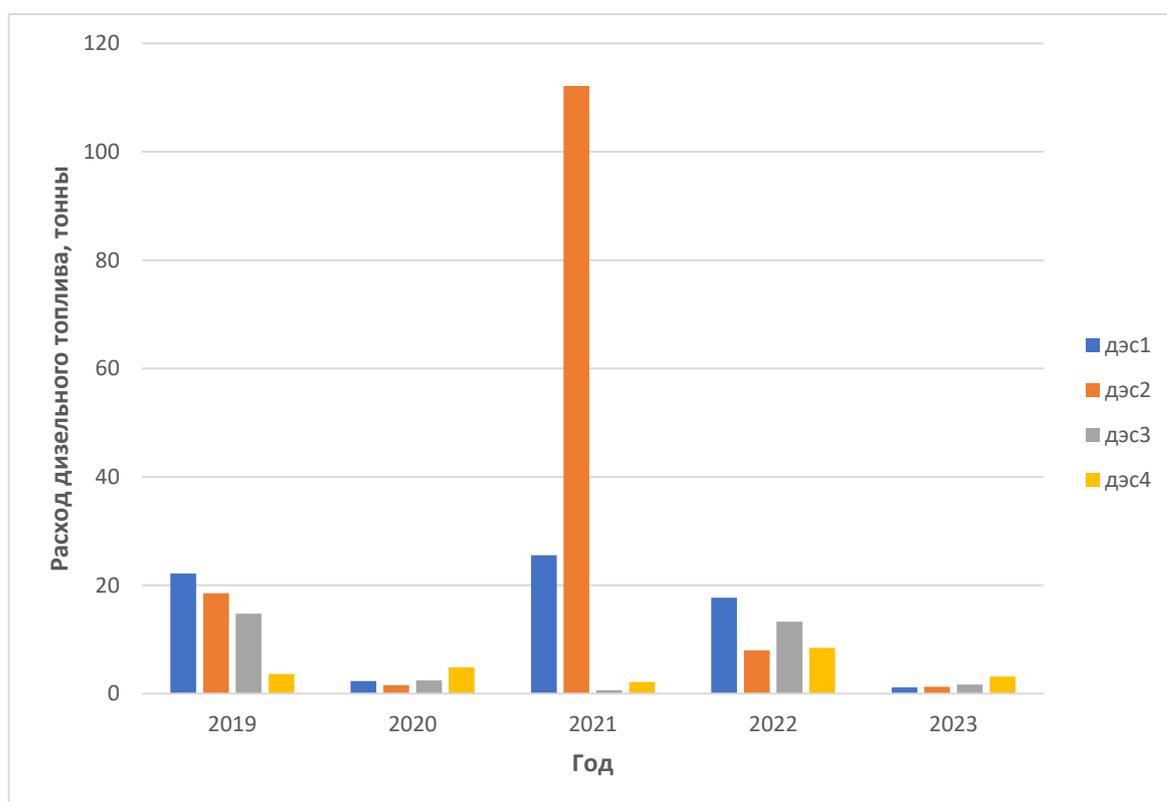


Рисунок 1.15 – Гистограмма годового расхода дизельного топлива

Максимальная выработка электрической энергии автономной системой электроснабжения на ГП №1 за аналогичный (рисунок 1.16) период составила 112,15 тыс.кВт·ч (ДЭС-2), где удельный расход составляет  $3,99 \frac{\text{тонны}}{\text{тыс.кВт}\cdot\text{ч}}$ .

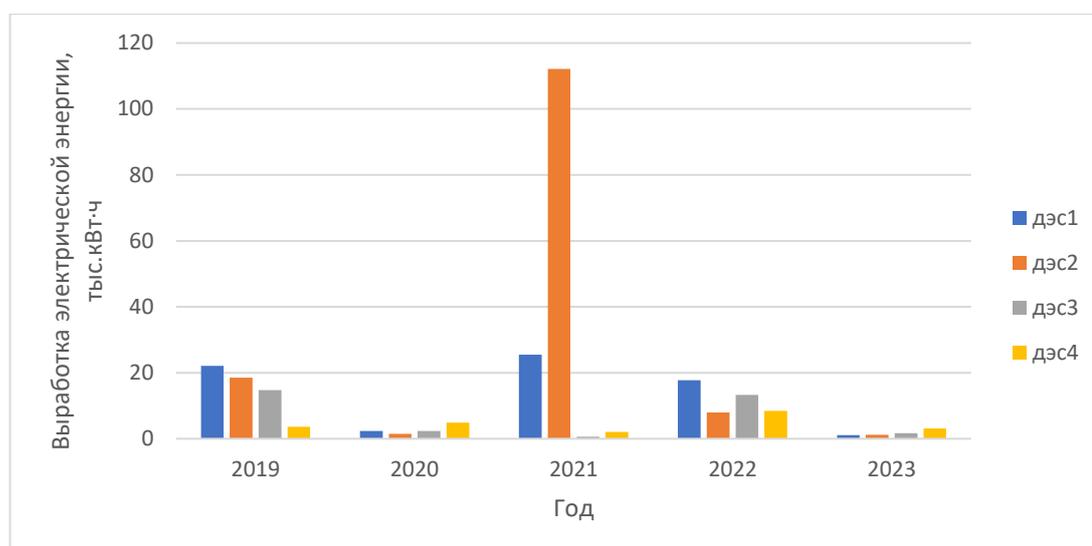


Рисунок 1.16 – Гистограмма годовой выработки электрической энергии

### 1.3.3. Расчет топливно-энергетических параметров

К каждой ДЭС подключается группа ЭП, которая создает мгновенные изменения напряжения, тока и частоты, которые отрицательно влияют на: перегрузочную способность, обеспечение необходимых показателей качества электрической энергии в зависимости от класса нагрузки каждой электростанции (стандарт ИСО 8528-5 класс G2). Величина изменений, возникающая при набросе и сбросе нагрузки, зависит от различных факторов: характера нагрузки, режима работы технологического оборудования, технических характеристик ДЭС, условий эксплуатационных ограничений электростанций (ИСО 3046-1, ИСО 8528-1). Основная часть нагрузки ГП №1 это нерегулируемые АД с прямой системой пуска. Как правило, ДЭС ограничены по мощности и перегрузочной способности, что делает такие системы чувствительными к току нагрузки и пиковому току нагрузки, который не должен превышать максимальный ток генерации ДЭС.

Для определения максимальной нагрузки одного или группы ЭП необходимо найти пиковый ток (таблица 1.12), для одиночного

электродвигателя пиковый ток будет являться пусковым током. Пиковый ток для групповой нагрузки определяется [28]:

$$I_{\text{пик}} = I_{n.\text{max}} + (I_p - k_u \cdot I_{\text{ном.мах}}), \quad (1.19)$$

где  $I_{n.\text{max}}$  – пусковой ток электродвигателя наибольшей мощности,  $k_u$  – коэффициент использования, характерный для электродвигателя с наибольшим номинальным током [29],  $I_{\text{ном.мах}}$  – номинальный ток электродвигателя с наибольшим пусковым током,  $I_p$  – расчетный ток нагрузки группы ЭП, который определяется:

$$I_p = \frac{S_p}{\sqrt{3} \cdot U_n}, \quad (1.20)$$

где  $S_p$  – сумма полных мощностей на двух секциях КТП из (1.13),  $U_n$  – номинальное напряжение на вторичной обмотке трансформатора в КТП.

Таблица 1.12 – Пиковая нагрузка, создаваемая группой ЭП на двух секциях КТП

№ КТП	$S_p$ , кВА	$I_p$ , А	$k_u$	$I_{\text{ном.мах}}$ , А	$I_{\text{п.мах}}$ , А	$I_{\text{пик}}$ , А
1	514,08	742,01	0,1	180	800	1524,01
2	646,13	932,61	0,8	100	400	1252,61
3	392,17	566,05	0,7	190	950	1383,05
4	406,41	586,6	0,1	175	875	1444,11
5	299,05	431,65	0,8	100	400	751,65
6	310,66	447,54	0,8	100	400	767,54
7	222,04	320,49	0,8	100	400	640,49
8	235,05	339,26	0,8	100	400	659,26

Используя паспортные характеристики ДЭС (Cummins C900D5, КАС-630, БЭС-630), был сравнен ток генерации ДЭС с пиковым током для групповой нагрузки (из таблицы 1.12). Анализ показал превышение пикового тока над максимальной силой тока генерации ДЭС на 15...20 % (таблица 1.13).

Таблица 1.13 – Сравнение тока генерации ДЭС с пиковым током групповой нагрузки

Тип станции	Номинальный ток в основном режиме, А	Максимальная сила тока, А	$I_{\text{пик}}, \text{А}$
Cummins C900D5	1037	1296	1524,01
Разница с $I_{\text{пик}}, \%$	-31,96	-14,96	
КАС-630	1010	1154	1383,05
Разница с $I_{\text{пик}}, \%$	-26,97	-16,56	
БЭС-630	1015	1162	1444,11
Разница с $I_{\text{пик}}, \%$	-29,71	-19,54	

Расход топлива ДЭС зависит от коэффициента загрузки и частоты вращения его вала. По показаниям ежемесячного потребления электроэнергии КТП за 2019 год (таблица 1.14), был рассчитан месячный коэффициент загрузки ДЭС №1, №2, №3 (рисунок 1.17).

Таблица 1.14 – Показания ежемесячного потребления электроэнергии КТП за 2019 год, кВт·ч

№ КТП	январь	февраль	март	апрель	май	июнь	июль	август	сентябрь	октябрь	ноябрь	декабрь
1	348	328	393	339	366	226	318	343	331	343	337	359
3	292	270	291	271	269	227	85	98	231	269	285	314
4	307	290	278	249	230	150	169	174	212	242	293	335

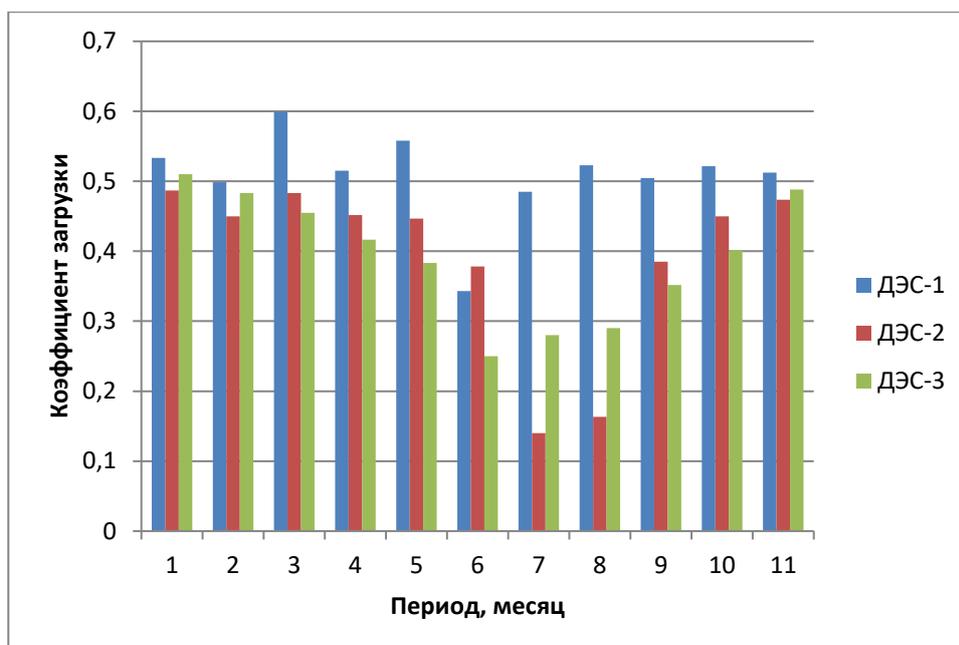


Рисунок 1.17 – Гистограмма месячных коэффициентов загрузки ДЭС (2019г.)

Анализ литературы [30] показывает, что если коэффициент загрузки для ДЭС лежит ниже 0,4, то наблюдается работа с повышенным удельным расходом топлива и проявляется эффект карбонизации (коксования), вызванной скоплением в цилиндрах продуктов неполного сгорания топлива, что ведет к снижению ресурса двигателя. Коэффициент загрузки для ДЭС, обеспечивающий оптимальное потребление дизельного топлива, должен стремиться к 0,75. Загрузка ДЭС более чем на 0,75 ведет к снижению коэффициента полезного действия и перерасходу топлива. Месячные коэффициенты загрузки ДЭС ГП №1 находятся в пределах от 0,13 до 0,6, а годовые средневзвешенные коэффициенты загрузки лежат ниже 0,75 (ДЭС-1 – 0,51; ДЭС-2 – 0,38; ДЭС-3 – 0,39), что говорит об избыточной установленной мощности ДЭС, и, как следствие, о ненормированном перерасходе дизельного топлива на единицу выпускаемой продукции.

## Выводы по первой главе

1. Подробно проанализирована структура ГП №1 ЯНГКМ ООО «Газпром добыча Ямбург». Описана общая характеристика технологического процесса добычи и подготовки природного газа на УКПГ и ДКС, необходимая для исследования режимов работы ЭТК ГП.

2. Проведена оценка энергетических параметров СЭС и энергоэффективности ЭТК, которая выявила сезонную зависимость увеличения сетевой мощности потребления электрической энергии.

3. Проведен сравнительный анализ мощности потребления электроэнергии ГП, который показал, что максимальное потребления электрической энергии в летний период эксплуатации осуществляется за счет работы многодвигательной системы ЭТК АВО газа с прямой системой пуска.

4. Предварительное энергетическое обследование электрических сетей на вводных ячейках в ЗРУ 6 кВ выявило, что коэффициент реактивной мощности находится в пределах в пределах 0,58...0,74, что не соответствует максимальному значению коэффициенту реактивной мощности, потребляемой в часы больших суточных нагрузок электрической сети. Коэффициент мощности находится в пределах 0,65...0,86, что указывает на наличие резервных возможностей повышения энергоэффективности.

5. Анализ ЭТК ГП выявил следующие особенности функционирования:

- 1) дискретный метод управления вентиляторами АВО газа;
- 2) прямая система пусков электродвигателей для ЭТК-1,2,3,4 создает критичное значение пикового тока нагрузки для автономной СЭС;
- 3) превышение пикового тока над максимальной силой тока генерации ДЭС на 15-20 %;
- 4) средневзвешенные коэффициенты загрузки лежат ниже 0,75 (ДЭС-1 – 0,51; ДЭС-2 – 0,38; ДЭС-3 – 0,39), что говорит об избыточной

установленной мощности ДЭС, и, как следствие, о ненормированном перерасходе дизельного топлива на единицу добычи и подготовки газа;

5) отсутствие автономной системы электроснабжения для ЭТК АВО газа ставит под угрозу обеспечение технологических процессов добычи и подготовки газа в аварийных режимах эксплуатации при полном исчезновении напряжения от централизованной СЭС.

Выявленные в первой главе диссертации особенности функционирования и недостатки ЭТК ГП с централизованной и автономной СЭС позволили обозначить основные задачи исследования, предлагаемые решения которых позволят достичь повышения эффективности работы основного оборудования УКПГ и ДКС газового промысла.

## **ГЛАВА II. РАЗРАБОТКА КОМПЬЮТЕРНОЙ МОДЕЛИ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА ГАЗОВОГО ПРОМЫСЛА НА ОСНОВЕ РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ В ПРОГРАММНОМ КОМПЛЕКСЕ MATLAB/SIMULINK**

### **Постановка задачи**

Одним из этапов технологического процесса подготовки природного газа на объектах газодобычи и транспортировки является его охлаждение. Анализ литературных источников [31-35] показывает, что основными потребителями на газовых промыслах в наиболее загруженный период эксплуатации являются АВО газа (рисунок 2.1) с вентиляторами на валу, объединенных в единый ЭТК. Основным направлением изучения в этой области является повышение эффективности функционирования, управления и оптимизация технологического процесса охлаждения природного газа, и повышение надежности работы ЭТК АВО газа в нормальных и аварийных режимах эксплуатации [36-40]. В нашей стране исследованиям по данной тематике посвятили свои научные труды ученые и специалисты: Артюхов И.И., Аршакян И.И., Абакумов А.М., Абакумов О.А., Степашкин И.П., Мигачев А.В., Крюков О.В., Борисов Д.С., Даденков Д.А., Шабанов В.А., Пашкин В.В. и многие другие. Несмотря на степень проработки и глубины изучения темы, использование различных инструментов и методов исследования, методы компьютерного моделирования ЭТК непрерывных энергоемких замкнутых производств, относящихся к газодобывающим предприятиям, проработаны недостаточно. Разработка компьютерной модели была выполнена с помощью расчетно-экспериментальных исследований на действующих установках АВО газа УКПГ и ДКС ГП с целью определения времени пуска АД серии ВАСО16-14-24 (ВАСО 4-37-24) с вентиляторами на валу. Развитие теории компьютерного моделирования и проведение

исследований в данной области для газовой промышленности является важным научно-техническим направлением, которое связано с поиском решений на компьютерных моделях способов повышения эффективности функционирования ЭТК без непосредственного использования оборудования на опасных производственных объектах.

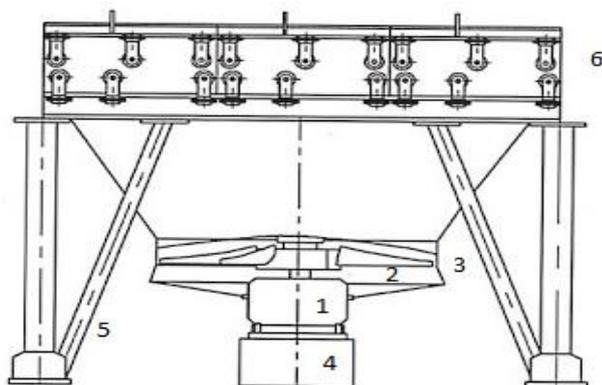


Рисунок 2.1 – Схематическое изображение АВО газа:

1-асинхронный двигатель; 2-лопасти вентилятора; 3-диффузор;  
4-станина; 5-металлоконструкция; 6-теплообменный блок

Широкое распространение в качестве на объектах газодобычи и транспортировки газа получили тихоходные многополюсные АД с короткозамкнутым ротором серии ВАСО16-14-24 (ВАСО4-37-24) номинальной мощностью 37 кВт. Анализ литературных источников [41-42] показал, что рабочие характеристики тихоходных двигателей ВАСО с рабочими колесами малоизучены, данные об исследовании динамических режимов электродвигателей ВАСО с вентиляторами на валу в литературе практически отсутствуют. Проведение экспериментальных исследований с рабочим колесом на валу проводилось в работе [42], однако в данном случае рассматривался менее распространенный в газовой промышленности АД серии ВАСО-13-12. В 2004 году экспериментальные исследования проводились для АД серии ВАСО16-14-24 с рабочим колесом типа Т-50-4(6) [43]. Эти рабочие колеса были изготовлены из стали, имели большой вес и

момент инерции, и аэродинамический профиль лопастей был далек от совершенства. С появлением композитных материалов в системе ПАО «Газпром» началась замена тяжелых стальных рабочих колес на более легкие стеклопластиковые, разработки ЗАО «Гидроаэроцентр», в том числе на тип ГАЦ-50-4М2 (рисунок 2.2).



Рисунок 2.2 – Внешний вид АД серии ВАСО16-14-24 со стеклопластиковым рабочим колесом

Применение композитных материалов помогло существенно снизить массу рабочего колеса, а оптимизация профиля – повысить КПД [45-46]. Существенное снижение массы рабочего колеса позволило уменьшить ПМИ вращающихся частей системы «АД – рабочее колесо», вследствие чего многократно уменьшилось время пуска АВО газа. Время пуска является важной технической информацией, которая необходима для повышения достоверности компьютерной модели с реальным объектом газового промысла, но в настоящее время определение разгонных характеристик и ПМИ для ЭТК АВО газа, где используются АД указанных серий со стеклопластиковыми рабочими колесами типа ГАЦ-50-4М2 не проводились или не были обнародованы.

## 2.1. Разработка модели ЭТК ГП

### 2.1.1. Исследование элементов модели

#### 2.1.1.1. Структура модели

Структурно модель для ЭТК ГП разбивается на элементы и измерительные блоки (рисунок 2.3). Расчёт параметров элементов ЭТК производится с помощью схем замещения, применяемых в блоках настройки электротехнических систем и устройств MATLAB/SIMULINK по их паспортным (каталожным) данным и электромеханическим характеристикам.

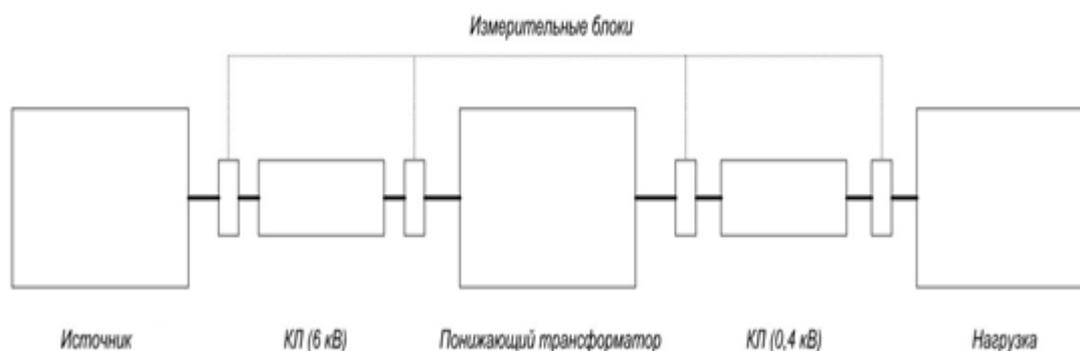


Рисунок 2.3 – Структурная схема модели ЭТК

Для модели ЭТК АВО газа (рисунок 2.4) расчёт параметров схемы замещения производится для источника электроснабжения, КЛ, понижающего трансформатора, АД по каталожным данным, а ПМИ лопастей вентилятора определялись с помощью расчетных данных и расчетно-экспериментальных методов.

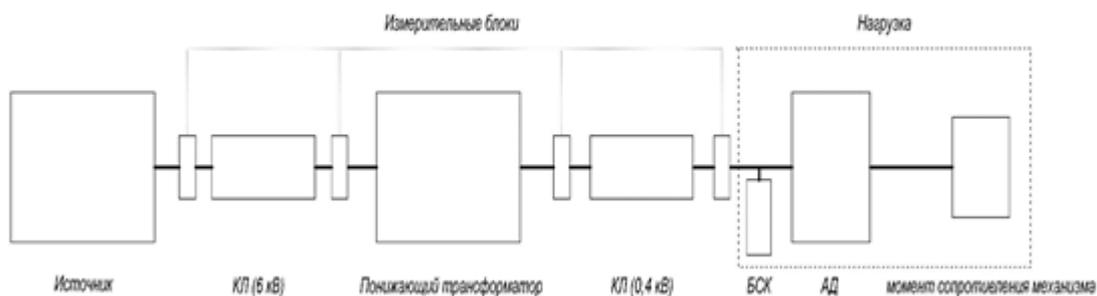


Рисунок 2.4 – Структурная схема модели ЭТК АВО газа

### 2.1.1.2. Трансформатор 6/0,4 кВ

В качестве объекта моделирования были выбраны силовые трансформаторы типа ТМЗ-1600(1000)/6/0.4, ТМЗ-1000(1000)/6/0.4 отечественного производства, применяемые в составе КТП ГП №1 ООО «Газпром добыча Ямбург» с параметрами, приведёнными в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Каталожные (паспортные) данные трансформатора типа ТМЗ-1600(1000)/6/0.4

Параметр	Обозначение	Значение		Единицы измерения
Число фаз	$m$	3		-
Номинальная мощность трансформатора	$S_{\text{ном}}$	1600	1000	кВА
Напряжение ВН	$U_{1\text{ном}}$	6		кВ
Напряжение НН	$U_{2\text{ном}}$	0,4		кВ
Номинальная частота сети	$f$	50		Гц
Напряжение короткого замыкания	$U_{\text{к}}$	4,5	5,5	%
Потери короткого	$P_{\text{к}}$	18	10,8	кВт

Параметр	Обозначение	Значение		Единицы измерения
замыкания				
Потери холостого хода	$P_0$	2,35	1,55	кВт
Ток холостого хода	$I_0$	1,3	1,2	%
Схема соединения обмоток	D/Yn-11			

Для определения параметров Т-образной схемы замещения силового трансформатора (рисунок 2.5) по каталожным данным в программе MATLAB/SIMULINK, были проанализированы работы [47-49] (активное сопротивление первичной обмотки и приведенное сопротивление вторичной обмотки трансформатора переводятся в индуктивность).

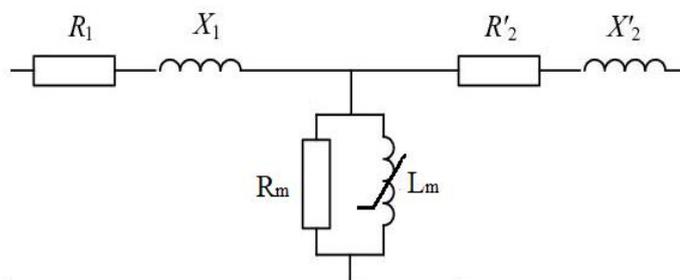


Рисунок 2.5 – Т-образная схема замещения двухобмоточного трансформатора в MATLAB/SIMULINK

Расчет параметров для модели трансформатора из библиотеки MATLAB/SIMULINK был выполнен в относительных единицах (таблица 2.2). Сравнение эмпирических и расчетных значений параметров схемы замещения (таблица 2.3), показало относительную погрешность не более 3% [50]. Расчет параметров производился с учётом насыщения стали магнитопровода (таблица 2.4) [49].

Таблица 2.2 – Именованные значения параметров схемы замещения в относительных единицах (о.е.)

№	Наименование величины	Параметр	Значение
1	Активное сопротивление ветви намагничивания	$R_m(o.e.)$	678,127
2	Индуктивность ветви намагничивания	$L_m(o.e.)$	77,128
3	Активное сопротивление первичной обмотки трансформатора	$R_1(o.e.)$	0,00563
4	Активное сопротивление вторичной обмотки трансформатора	$R'_2(o.e.)$	0,00563
5	Индуктивность первичной обмотки трансформатора	$L_1(o.e.)$	0,0219
6	Индуктивность вторичной обмотки трансформатора	$L_2(o.e.)$	0,0219

Таблица 2.3 – Сравнение эмпирических и расчетных значений параметров схемы замещения трансформатора

Параметр	Эмпирические значения ( $Y_{эмп}$ ), (о.е.)	Расчетные значения ( $Y_{расч}$ ), (о.е.)	Относительная погрешность ( $(Y_{эмп}-Y_{расч})/Y_{эмп}$ ), %
$R_1=R_2$	0,005625	0,00563	0,089
$L_1=L_2$	0,0225	0,0219	-2,74
$R_m$	680,851	678,127	-0,4
$L_m$	76,923	77,128	0,27

Таблица 2.4 – Расчетные значения характерных точек кривой намагничивания

№ точки	$\Psi$ , о.е.	$I_\mu$ , о.е.
1	$\psi_1 = 0$	$i_1 = 0$

№ точки	$\Psi$ , о.е.	$I_{\mu}$ , о.е.
2	$\psi_2 = 1,15$	$i_2 = 0,01495$
3	$\psi_3 = 1,2175$	$i_3 = 1$

Компьютерная модель состоит из следующих блоков: идеальный трехфазный источник напряжения, измерительный блок напряжения и тока, трёхфазный двухобмоточный трансформатор, блок измерения активной и реактивной мощности, блок расчета модуля комплексного числа по его действительной и мнимой части, дисплей. Для сравнения паспортных данных (таблица 2.1) и расчётных значений, были проведены опыты холостого хода и короткого замыкания со следующими начальными условиями: 1) в качестве источника питания используется идеальный трёхфазный источник напряжения (сопротивление источника равно нулю); 2) при проведении опыта короткого замыкания напряжение источника умножается на  $U_k$  (из таблицы 2.1). При проведении моделирования на дисплее отображаются результаты измерений активной, реактивной и полной мощности трансформатора, которые показывают, что потери холостого хода (рисунок 2.6) и короткого замыкания (рисунок 2.7) совпадают с паспортными данными (таблица 2.5).

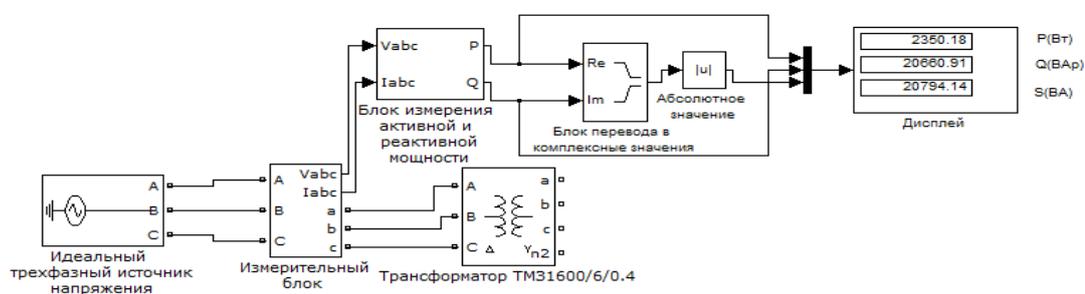


Рисунок 2.6 – Опыт холостого хода трансформатора типа ТМЗ1600/6/0,4

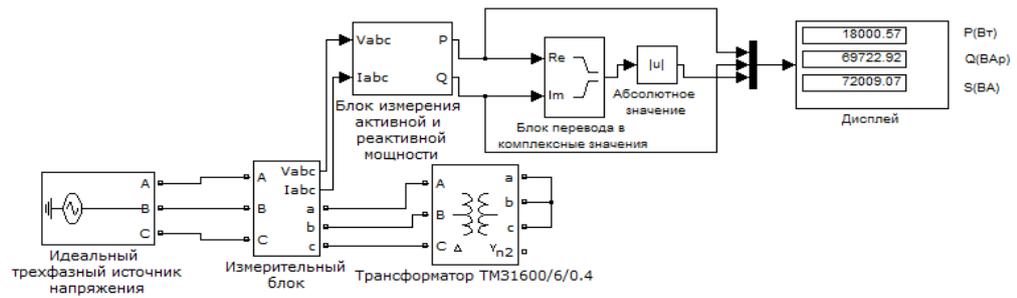


Рисунок 2.7– Опыт короткого замыкания трансформатора типа ТМ31600/6/0,4

Таблица 2.5 – Сравнение паспортных и смоделированных значений параметров трансформатора

Параметр	Наименование величины	Паспортное значение ( $U_{\text{пасп}}$ ), Вт	Результаты моделирования ( $U_{\text{расч}}$ ), Вт	Абсолютная погрешность ( $U_{\text{пасп}} - U_{\text{расч}}$ )
$P_0$	Потери холостого хода	2350	2350,18	-0,18
$P_k$	Потери короткого замыкания	18000	18000,57	-0,57

Аналогичным образом рассчитываются параметры схемы замещения для двухобмоточного трансформатора типа ТМЗ/1000/6/0.4. Результаты расчетов параметров схемы замещения для трансформаторов ТМ31600(1000)/6/0,4, необходимые для дальнейшего моделирования ЭТК АВО с централизованной СЭС, вносятся в таблицу 2.6.

Таблица 2.6– Параметры схемы замещения трансформаторов ГП №1

Параметр	ТМ31600/6/0,4 (о.е.)	ТМ31000/6/0,4 (о.е.)
$R_1=R_2$	0,005625	0,0054

$L_1=L_2$	0,0225	0,0275
$R_m$	678,127	645,1613
$L_m$	77,128	88,333

### 2.1.1.3. Асинхронный электродвигатель

В качестве объекта моделирования был выбран АД серии ВАСО4-37-24 (таблица 2.7) с композитным стеклопластиковым рабочим колесом типа ГАЦ-50-4М2.

Таблица 2.7 – Каталожные данные АД серии ВАСО 4-37-24

Наименование параметра	Значение
Номинальная мощность, $P_n$	37 кВт
Номинальное напряжение, $U_{ном}$	380 В
Число фаз, $m$	3
Номинальная частота вращения, $n_n$	246 об/мин
Синхронная частота вращения, $n_1$	250 об/мин
Номинальное скольжение, $S_n$	1,6 %
Коэффициент мощности, $\cos\varphi$	0,63
КПД, $\eta$	89 %
Отношение пускового тока к номинальному току, $\lambda$	3,9
Отношение пускового момента к номинальному моменту, $k_p$	0,8
Отношение максимального момента к номинальному моменту, $k_m$	2,4
Момент инерции ротора, $J$	26 кг·м <sup>2</sup>
Число пар полюсов, $2p$	12
Соединение обмоток статора	Y/Δ

Для определения параметров Т-образной схемы замещения АД (рисунок 2.8) по каталожным данным в программе MATLAB/SIMULINK, были проанализированы работы [51-56] (активное сопротивление первичной обмотки и приведенное сопротивление вторичной обмотки АД переводятся в индуктивность).

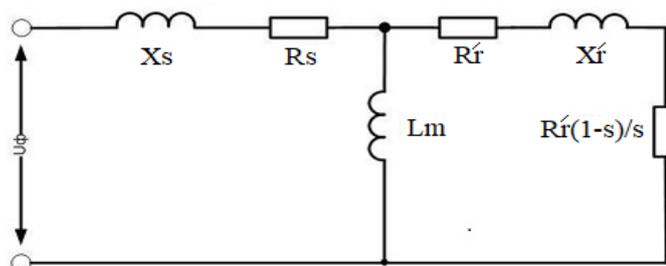


Рисунок 2.8 – Т-образная схема замещения АД в MATLAB/SIMULINK

Анализ литературы показал, что, несмотря на большое количество работ, посвященных определению параметров схемы замещения АД по каталожным данным, в них отсутствуют простые и удобные для применения методики расчета. В данной работе проведен сравнительный анализ результатов расчета параметров схемы замещения АД по трем методикам: методика 1 [57], методика 2 [58], методика 3 [59] (таблица 2.8).

Таблица 2.8 – Результаты расчета параметров схемы замещения по каталожным данным

Наименование расчетной величины	Параметр	Методика №1	Методика №2	Методика №3
Активное сопротивление обмотки статора, Ом	$R_s$	0,103514	0,083017	0,0219
Активное сопротивление обмотки ротора, Ом	$R_r'$	0,020455	0,035206	0,051

Наименование расчетной величины	Параметр	Методика №1	Методика №2	Методика №3
Активное сопротивление обмотки статора, Ом	$R_s$	0,103514	0,083017	0,0219
Активное сопротивление обмотки ротора, Ом	$R_r'$	0,020455	0,035206	0,051
Индуктивность обмотки статора, Гн	$L_s$	0,000426	0,000949	0,000888
Индуктивность обмотки ротора, Гн	$L_r$	0,000533	0,001178	0,001226
Индуктивность ветви намагничивания, Гн	$L_m$	0,008593	0,009789	0,007978

Для оценки рассчитанных параметров, была разработана компьютерная модель подсистемы АД ВАСО4-37-24 в программе компьютерного моделирования MATLAB и его приложении SIMULINK (рисунок 2.9) и модель для снятия совместных электромеханических характеристик АД по методикам (1-3) (рисунок 2.10). Компьютерная модель подсистемы состоит из следующих блоков: идеальный трехфазный источник напряжения (сопротивление источника равно нулю), асинхронный двигатель, блок задания нагрузки, измерительный блок (ток в статорной обмотке, электромагнитный момент, скорость вращения ротора), блок перевода скорости из рад/с в об/мин.

Результаты моделирования переходного процесса при прямом пуске на холостом ходу (значение блока задания нагрузки равно нулю) АД представлены на графиках (рисунки 2.11-2.15).

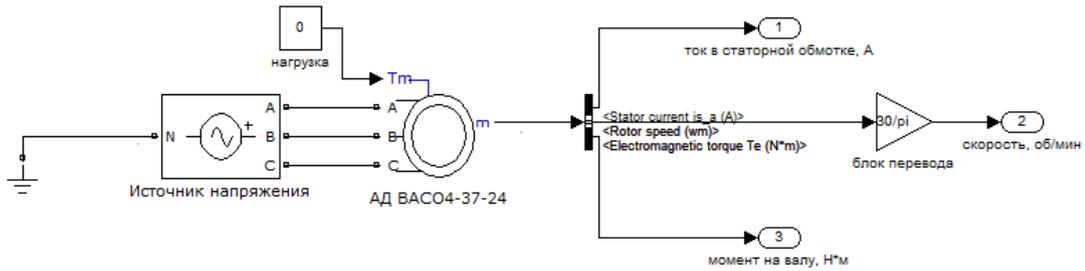


Рисунок 2.9 – Модель подсистемы АД ВАСО4-37-24

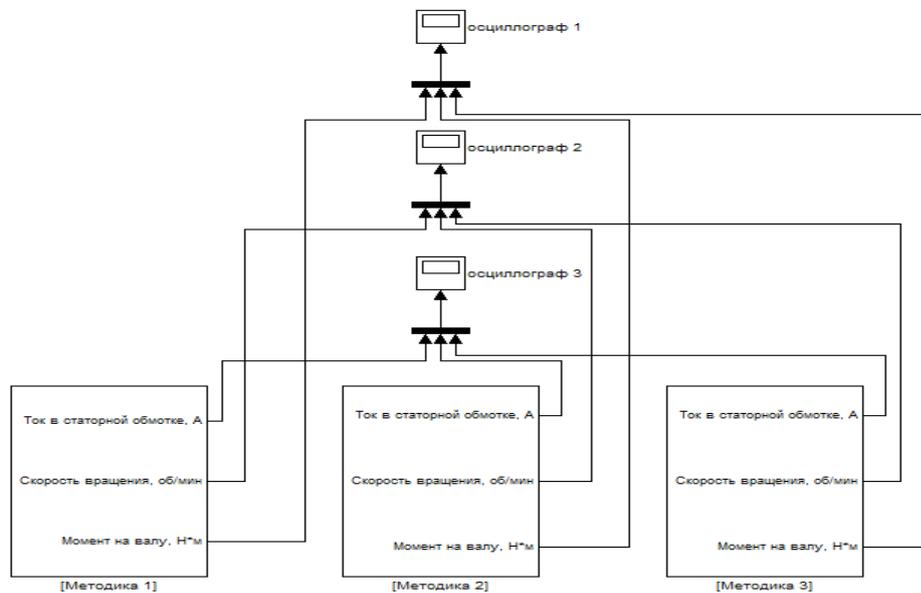


Рисунок 2.10 – Модель системы для снятия совместных электромагнитных характеристик АД

На графике (рисунок 2.11) показаны параметры скорости вращения двигателя в зависимости от времени моделирования. Время разгона двигателя для методик 2 и 3 практически совпали, выход на номинальную скорость составляет 1,3 секунды. Для методики 1 выход на номинальную скорость составил 1 секунду, однако данный метод имеет более длительный период перерегулирования в отличие от методик 2 и 3. В начале пуска у АД из методики 3 наблюдается большее колебание скорости, чем у методики 1 и 2, что говорит о неточности расчета параметров из методики 3.

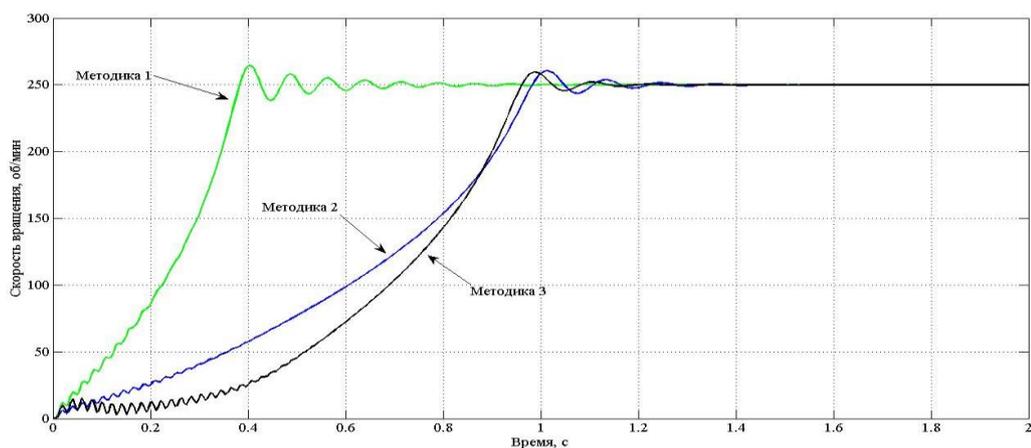


Рисунок 2.11 – График зависимости скорости вращения от времени

На графиках (рисунки 2.12-2.14) показаны параметры тока в статорной обмотке АД в зависимости от времени моделирования, которые указывают на превышение паспортных значений пускового тока в 2,56 (методика 1), в 1,28 (методика 2) и в 1,53 (методика 3) соответственно. После переходного процесса номинальные токи для всех методик совпадают с паспортными значениями.

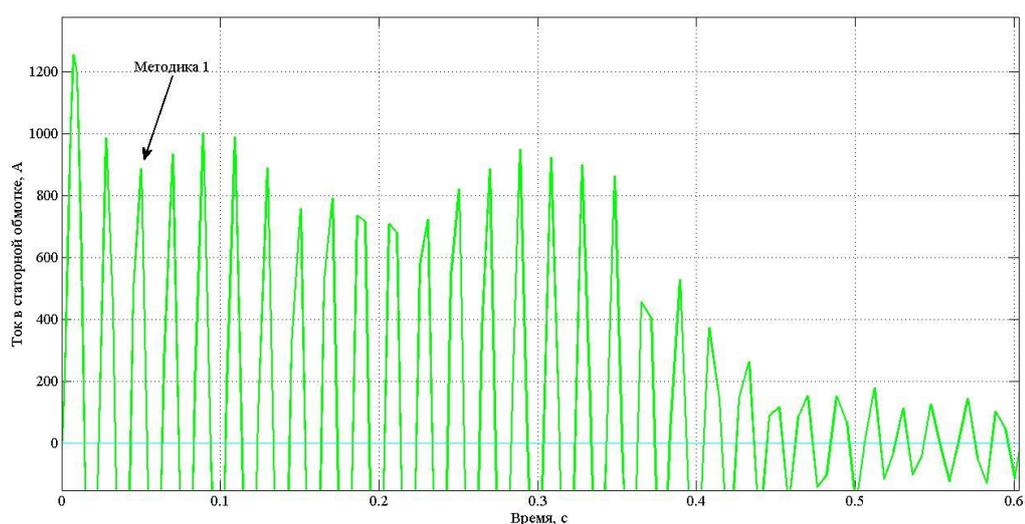


Рисунок 2.12 – График зависимости тока в статорной обмотке от времени (методика 1)

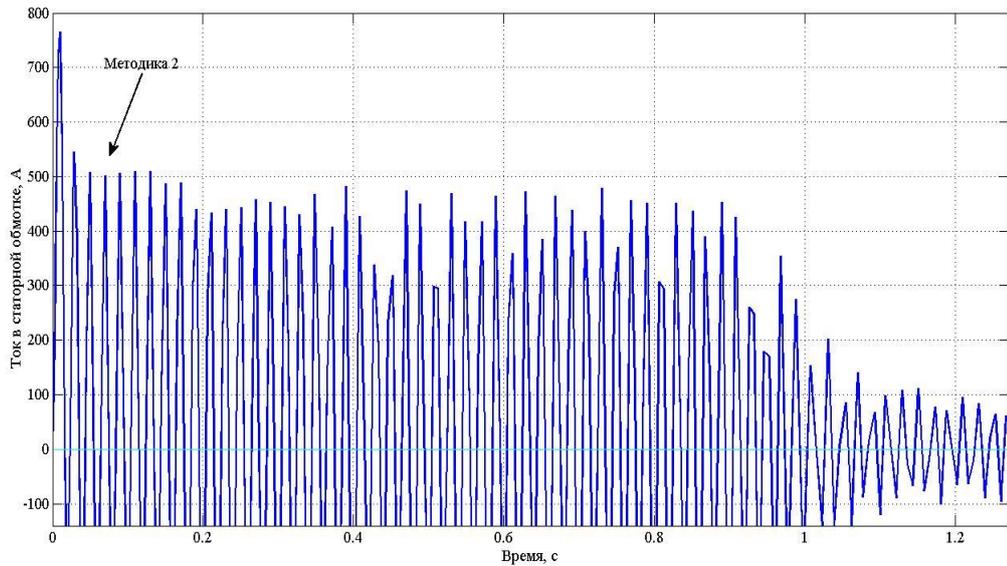


Рисунок 2.13 – График зависимости тока в статорной обмотке от времени (методика 2)

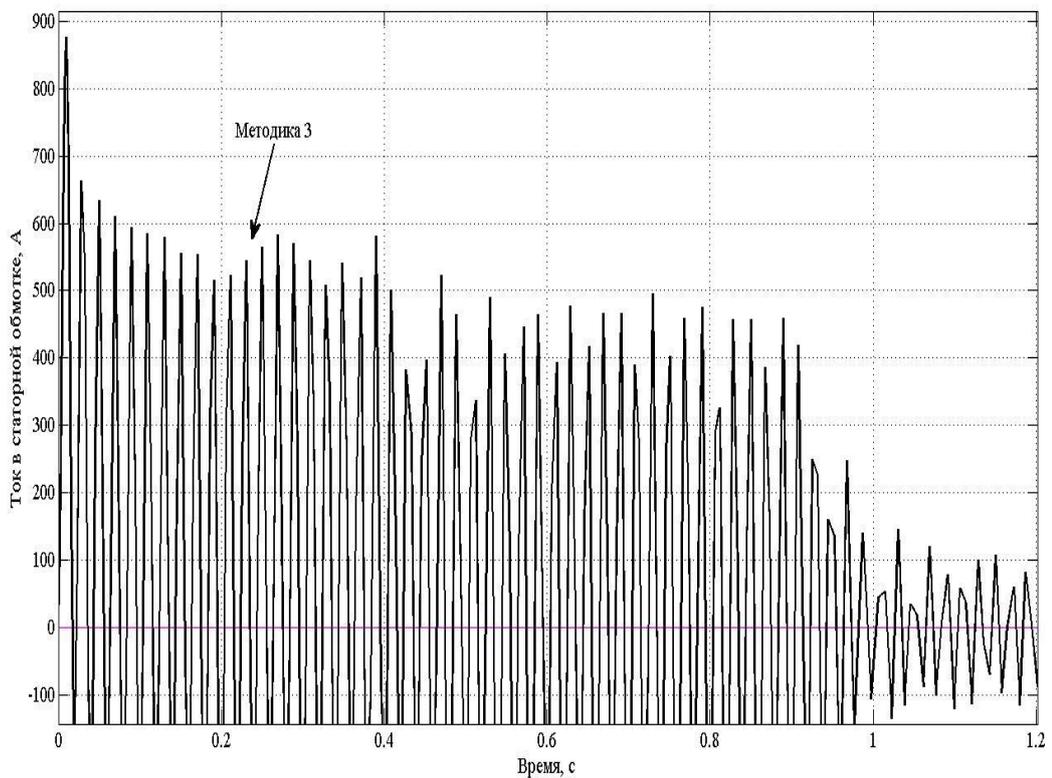


Рисунок 2.14 – График зависимости тока в статорной обмотке от времени (методика 3)

На графике (рисунок 2.15) показан электромагнитный момент на валу в зависимости от времени моделирования для методик 1-3. Наиболее близким к паспортному значению критического момента является методика 1, однако данная методика имеет самый большой пусковой момент и время затухания переходного процесса, по сравнению с методикой 2. Методика 3 по характеристикам имеет близкие значения с методикой 2, однако имеются колебания (около 200 Н·м) ротора (биение) в области номинального режима работы АД. Сравнительный анализ показал, что наиболее близкими к паспортным данным являются методики 2 и 3, однако для методики 3 требуется информация о коэффициентах полезного действия и мощности при различной нагрузке электродвигателя, которая не всегда доступна (не каталожный параметр), но может быть рассчитана, например, по формулам из [60].

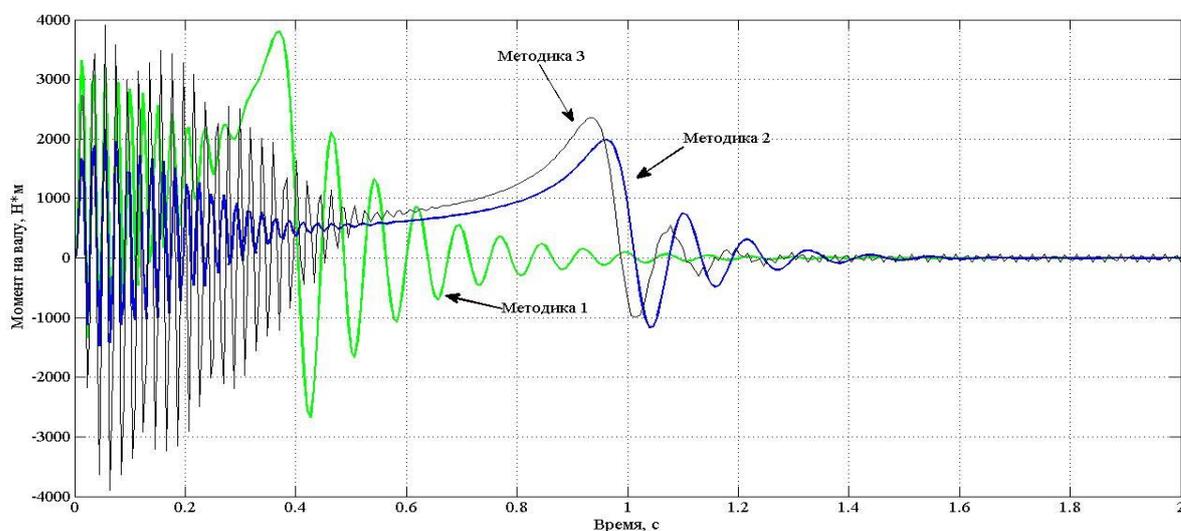


Рисунок 2.15 – График зависимости момента на валу от времени

#### 2.1.1.4. Трансформатор 110/6 кВ

Паспортные данные трансформатора серии ТДН-25000/110/6 приведены в таблице 2.9. Параметры схемы замещения модели могут быть определены выражениями [50,61]. Параметры проверяются на модели

(рисунки 2.6-2.7) (где сравнивается расчетное и смоделированное значение мощности трехфазного короткого замыкания за трансформатором). В зависимости от выбранного варианта настройки блока, результаты из таблицы 2.10 вносятся в окно настройки источника электроэнергии в программной среде MATLAB.

Таблица 2.9 – Каталожные (паспортные) данные трансформатора типа ТДН-25000/110/6

Параметр	Обозначение	Значение	Единицы измерения
Число фаз	$m$	3	-
Номинальная мощность трансформатора	$S_{\text{ном}}$	25000	кВА
Напряжение ВН	$U_{1\text{ном}}$	110	кВ
Напряжение НН	$U_{2\text{ном}}$	6	кВ
Номинальная частота сети	$f$	50	Гц
Напряжение короткого замыкания	$U_{\text{к}}$	10,5	%
Потери короткого замыкания	$P_{\text{к}}$	120	кВт
Потери холостого хода	$P_0$	17	кВт
Ток холостого хода	$I_0$	0,2	%
Схема соединения обмоток	Y/D-11		

Таблица 2.10 – Расчетные значения параметров трансформатора

№	Наименование величины	Параметр	Значение	Единицы измерения
1	Базисное напряжение	$U_{\text{баз}}$	6300	В
2	Базисная мощность (произвольный параметр)	$S_{\text{баз}}$	100	МВ·А

№	Наименование величины	Параметр	Значение	Единицы измерения
3	Индуктивное сопротивление схемы замещения трансформатора 110/6 кВ	$X_{тр-ра}$	0,42	о.е.
4	Мощность трехфазного короткого замыкания за трансформатором 110/6 кВ	$S_{k(3)}$	238,1	МВ·А
5	Индуктивное сопротивление трансформатора	$X_{ист}$	0,16669	Ом
6	Индуктивность трансформатора	$L_{ист}$	0,000531	Гн
7	Активное сопротивление трансформатора	$R_{ист}$	0,116669	Ом

### 2.1.1.5. Расчет нагрузки

В качестве нагрузки для многополюсных тихоходных электродвигателей серии ВАСО4-37-24 применяются композитные стеклопластиковые рабочие колеса типа ГАЦ-50-4М2 (рисунок 2.16).

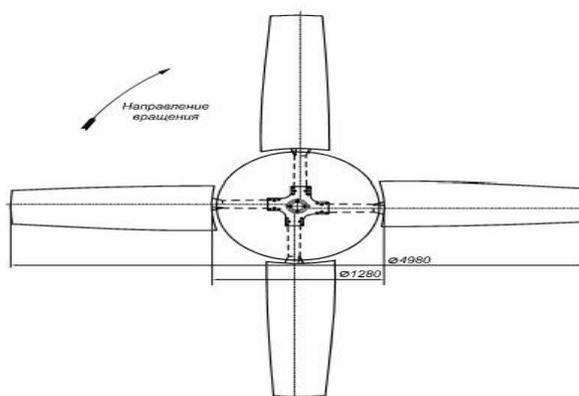


Рисунок 2.16 – Стеклопластиковое рабочее колесо типа ГАЦ-50-4М2

Для работы механизма с большим моментом инерции требуется выполнения динамичного разгона/торможения, при этом следует учитывать изменение момента привода АВО, связанного с инерционностью механизма.

Момент инерции привода АВО газа можно определить:

$$J = J_{\text{дв}} + J_{\text{вен}}, \quad (2.1)$$

где  $J_{\text{дв}}$  – момент инерции двигателя (таблица 2.7);  $J_{\text{вен}}$  – момент инерции вентилятора.

Приближенно осевой момент инерции вентилятора можно определить [62]:

$$J_{\text{вен}} = \frac{0,2 \cdot M_{\text{вен}} \cdot (0,4 \cdot R)^2}{2}, \quad (2.2)$$

где  $M_{\text{вен}}$  – суммарная масса рабочего колеса;  $R$  – радиус рабочего колеса (таблица 2.11).

Подставляя значения в формулу 2.1, получим:

$$J_{\text{вен}} \approx 0,5 \cdot J_{\text{дв}}.$$

Рассчитываем коэффициент вязкого трения:

$$F = \frac{\Delta P_{\text{мех}}}{\omega_{\text{ном}}^2}, \quad (2.3)$$

где  $\omega_{\text{ном}}$  – номинальная частота вращения;  $\Delta P_{\text{мех}}$  – механические потери в двигателе.

Механические потери в двигателе определяются [52]:

$$\Delta P_{\text{мех}} = (0,02 \dots 0,05) \cdot P_n, \quad (2.4)$$

где  $P_n$  – номинальная мощность двигателя (таблица 2.7).

Таблица 2.11 – Технические характеристики рабочего колеса ГАЦ-50-4М2

Наименование параметра	Значение
Диаметр рабочего колеса	4,98 м
Диаметр ступицы	1,28 м
Число лопастей	4
Масса рабочего колеса	140 кг
Масса лопасти	30 кг
Номинальный расход воздуха	510000 м <sup>3</sup> /ч
Номинальный статический напор	200 Па

Момент сопротивления двигателя задается [62]:

$$M_c = M_o + (M_{\text{ном}} - M_o) \cdot \left( \frac{\omega}{\omega_{\text{ном}}} \right)^2, \quad (2.5)$$

где  $M_o$  – момент сопротивления при пуске;  $M_{\text{ном}}$  – момент сопротивления при номинальной нагрузке;  $\omega$  – частота вращения ротора.

Момент сопротивления при номинальной нагрузке определяется [58]:

$$M_{\text{ном}} = \frac{P_n}{\eta \cdot \omega_{\text{ном}}}, \quad (2.6)$$

где  $\eta$  – КПД двигателя (таблица 2.7)

Момент сопротивления при пуске определяется [61]:

$$M_o = (0.05 \dots 0.1) \cdot M_{ном}. \quad (2.7)$$

Полученные значения из (2.1,2.3) вносятся в MATLAB в окно настройки АД, по уравнению (2.5) моделируется блок сопротивления (нагрузки) для АД. Значения, полученные из (2.1,2.3,2.4,2.6,2.7) вносятся в таблицу 2.12.

Таблица 2.12 – Результаты расчетных инерционно-механических характеристик АД АВО газа

Наименование величины	Параметры	Расчетные значения
Номинальный момент, Н·м	$M_{ном}$	1614,61
Момент сопротивления при пуске, Н·м	$M_o$	161,461
Механические потери в двигателе, Вт	$\Delta P_{мех}$	1850
Коэффициент вязкого трения, Н·м·с	F	2,79
Момент инерции привода АВО, кг·м <sup>2</sup>	J	39

#### 2.1.1.6. Кабельные линии

Для определения параметров схемы замещения КЛ, заданной в программе, (рисунок 2.17) необходимо найти активное сопротивление, индуктивность и емкость линии:

$$R_l = r_0 \cdot l, \quad (2.8)$$

$$L_l = \frac{x_0 \cdot l}{2 \cdot \pi \cdot f}, \quad (2.9)$$

$$C_l = c_0 \cdot l, \quad (2.10)$$

где  $r_0$  – удельное активное сопротивление линии;  $x_0$  – удельное индуктивное сопротивление линии;  $f$  – частота сети;  $C_0$  – удельная ёмкость линии (не учитываем для КЛ 0,4 кВ) (таблица 2.13).

Результаты вычисленных значений из (2.8-2.10) параметров схемы замещения КЛ в зависимости от номера КТП вносятся для каждой модели в окно настроек КЛ программы MATLAB.

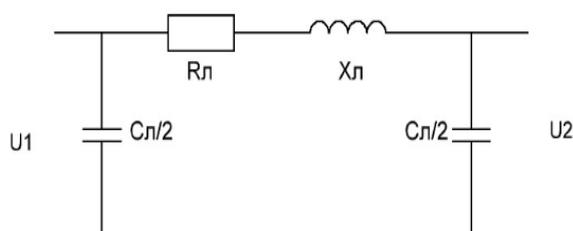


Рисунок 2.17 – Схема замещения КЛ в MATLAB/SIMULINK

Таблица 2.13 – Технические характеристики кабельных линий ЭТК АВО ГП №1

Наименование объекта	Марка кабеля	Длина, м	Удельное индуктивное сопротивление, ом/км	Удельное активное сопротивление, ом/км	Удельная ёмкость, мкФ/км
		$l$	$x_0$	$r_0$	$c_0$
КТП-2	ААШВ- 3×150 (6кВ)	200	0,074	0,206	0,51
	АВВГ- 4×50(1кВ)	150	0,0625	0,64	-
КТП-5	ААШВ- 3×95(6кВ)	350	0,078	0,326	0,42

Наименование объекта	Марка кабеля	Длина, м	Удельное индуктивное сопротивление, ом/км	Удельное активное сопротивление, ом/км	Удельная емкость, мкФ/км
		$l$	$x_0$	$r_0$	$c_0$
	АВВГ- 3×70+1×35 (1кВ)	120	0,0612	0,46	-
КТП-6	ААШВ- 3×95(6кВ)	400	0,078	0,326	0,42
	АВВГ- 3×70+1×35 (1кВ)	120	0,0612	0,46	-
КТП-7	ААШВ- 3×70 (6кВ)	750	0,084	0,443	0,4
	АВВГ- 3×70+1×25 (1кВ)	85	0,0612	0,46	-
КТП-8	ААШВ- 3×70 (6кВ)	800	0,084	0,443	0,4
	АВВГ- 3×70+1×25 (1кВ)	85	0,0612	0,46	-

## **2.1.2. Экспериментальное исследование АД серии ВАСО16-14-24, ВАСО4-37-24 со стеклопластиковым рабочим колесом типа ГАЦ-50-4М2 на валу**

### **2.1.2.1. Расчетно-экспериментальное исследование приведенного момента инерции**

Эксперименты по определению кривой свободного выбега проводились поочередно для АД серии ВАСО4-37-24, ВАСО16-14-24, с композитным стеклопластиковым рабочим колесом типа ГАЦ-50-4М2 на действующих установках АВО газа УКПГ и ДКС газового промысла. Этапы эксперимента: 1) пуск АД до достижения номинальной скорости вращения; 2) отключение АД до полной остановки. Регистрируемые параметры – скорость вращения лопасти вентилятора после отключения АД до полной остановки в единицу времени.

Регистрация скорости вращения при свободном выбега АД АВО газа проводилась в зимний период эксплуатации (температура окружающего воздуха  $-25^{\circ}\text{C}$ , АД проработал до отключения не менее 5 минут) с помощью цифрового бесконтактного тахометра серии DT-2234C+ (рисунок 2.18). В основу измерения скорости вращения положен принцип подсчета количества импульсов от вращающейся светоотражающей метки за единицу времени, установленной на лопасти АВО газа [64] (рисунок 2.19).



Рисунок 2.18 – цифровой бесконтактный тахометр серии DT-2234C+



Рисунок 2.19 – Светоотражающая полоска на лопасти АВО газа

В ходе эксперимента были получены кривые свободного выбега для АД серии ВАСО и на их основе построены зависимости потерь мощности электродвигателя от времени (рисунки 2.20-2.21).

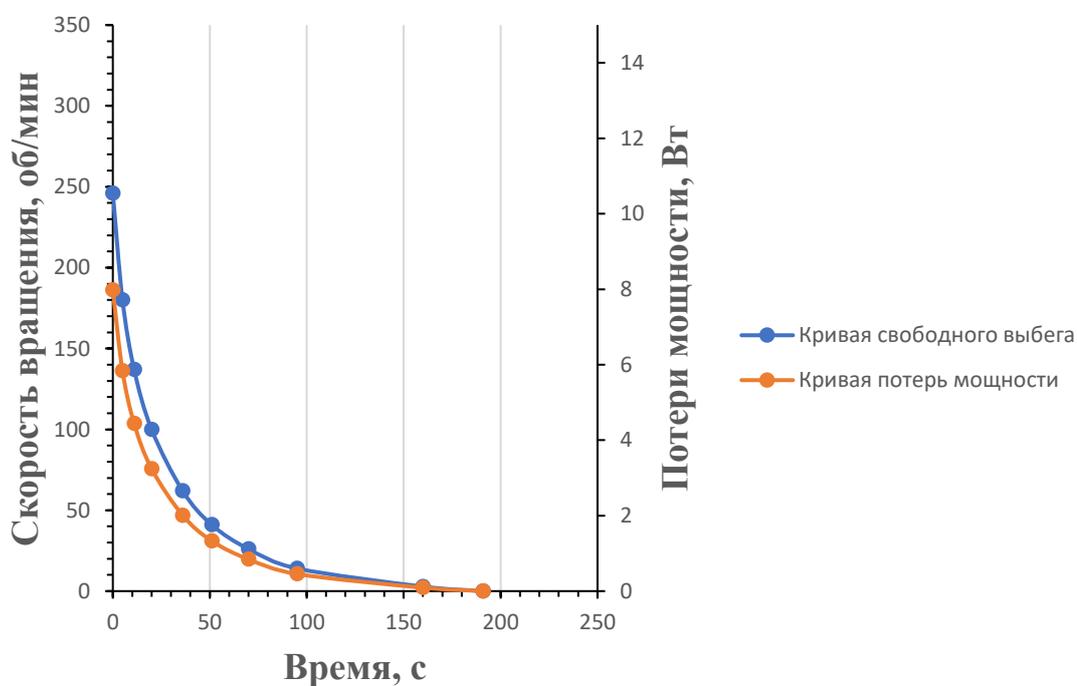


Рисунок 2.20 – Экспериментальные характеристики для ВАСО4-37-24

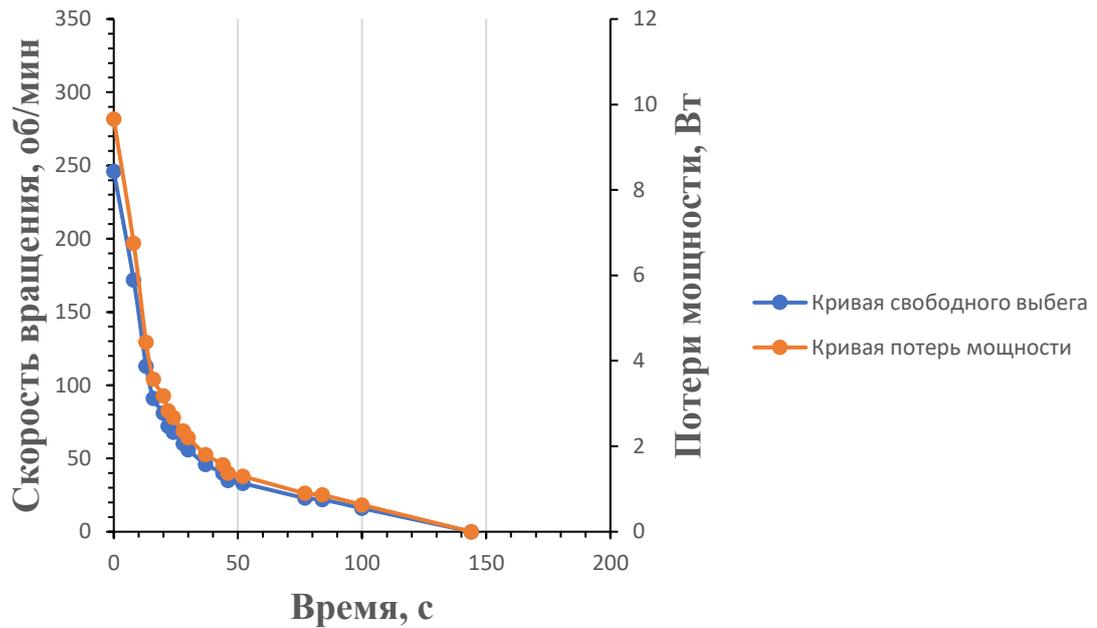


Рисунок 2.21 – Экспериментальные характеристики для ВАСО16-14-24

ПМИ для вращающихся частей системы «АД - рабочее колесо» АВО газа был исследован по полученным экспериментальным зависимостям кривой свободного выбега и потерь мощности с помощью графоаналитических методов (№1, №2) [65].

Для графоаналитического метода №1 кинетическая энергия, запасенная АВО газа, при свободном выбеге будет расходоваться на преодоление потерь мощности при самоторможении:

$$W_{аво} = \frac{J \cdot \omega^2}{2}, \quad (2.11)$$

где  $J$  – момент инерции АВО газа;  $\omega$  – угловая скорость вентилятора.

Следовательно, момент инерции АВО газа из (2.11) определяется как:

$$J = \frac{2 \cdot W_{аво}}{\omega^2}, \quad (2.12)$$

где мощность потерь, которая рассеивается в виде тепла при самоторможении АВО газа, определяется:

$$P_{mp} = \frac{dW_{аво}}{dt}. \quad (2.13)$$

Для определения работы, затраченной на преодоление потери мощности, необходимо найти площадь, заключенную между кривой потерь мощности и осями координат. Потери мощности электродвигателя от времени самоторможения (из рисунков 2.20-2.21) задается в виде линии тренда. Для описания линии тренда использовался полиномом с различными степенями в программном комплексе MS Excel.

Для нахождения площади, заключенной между линией тренда и осями координат, необходимо найти определенный интеграл:

$$P_{mp} = \int_0^{t_{ост}} f(t)dt, \quad (2.14)$$

где  $f(t)$  – уравнение аппроксимирующей линии тренда кривой потери мощности;  $t_{ост}$  – время остановки АД.

Увеличивая степень полинома для линии тренда (величина достоверности аппроксимации линии тренда рассчитывается с помощью компьютерной программы MS Excel) и экспериментальной кривой потерь мощности получаем постепенное приближение к значению площади, заключенной между линией тренда и осями координат (2.14). Подставляя найденные значения из (2.13) в выражение (2.12), находим приведенный момент инерции АВО газа (таблица 2.14).

Таблица 2.14 – Приведенный момент инерции АВО газа (графоаналитический метод № 1)

Наименование серии АД	Уравнение аппроксимирующей линии тренда	Величина достоверности аппроксимации линии тренда	$t_{\text{ост}}, \text{с}$	Момент инерции, $\text{кг}\cdot\text{м}^2$
ВАСО4-37-24	$0,0323x^2 - 8,4431x + 482,8$	0,8969	84	51,90
	$-0,0004x^3 + 0,1267x^2 - 14,352 + 536,32$	0,9607	79	46,73
	$-7E-8x^5 + 4E-5x^4 - 0,0074x^3 + 0,6497x^2 - 28,218x + 597,82$	0,996	45,61	38,42
ВАСО16-14-24	$0,048x^2 - 9,3996x + 428,51$	0,7787	71	78,09
	$-0,001x^3 + 0,2599x^2 - 20,656x + 552,82$	0,9478	140	62,69
	$-7E-10x^6 + 6E-08x^5 + 5E-05x^4 - 0,0106x^3 + 0,9025x^2 - 35,202x + 624,77$	0,9937	74	45,11

Для графоаналитического метода №2 основное уравнение движения электропривода имеет вид:

$$M_{\text{дв}} = M_c + J \cdot \frac{d\omega}{dt}, \quad (2.15)$$

где  $M_{\text{дв}}$  – момент двигателя;  $M_c$  – момент сопротивления;  $J$  – момент инерции;  $\omega$  – угловая скорость.

В случае самоторможения  $M_{\text{дв}} = 0$ , а  $M_c$  является общим моментом сопротивления механизма и момента потерь мощности привода, тогда выражение (2.15) для  $J$  примет вид [65]:

$$J = -M_c \frac{dt}{d\omega}, \quad (2.16)$$

где  $M_c = \frac{\Delta P_{\text{мех}}}{\omega}$  – механические потери вращения АД, соответствующие скорости  $\omega$  (рисунки 2.20-2.21);  $\frac{d\omega}{dt} = \text{tg}\alpha$  – коэффициент наклона касательной проведенной к рассматриваемой точке графика самоторможения ( $x_0$ ) к оси времени.

Угловой коэффициент касательной равен производной от функции  $f$  в точке  $x_0$ :

$$k = \text{tg}\alpha = f'(x_0). \quad (2.17)$$

Находим момент инерции, используя формулы (2.16-2.17) (таблица 2.15).

Таблица 2.15 – ПМИ АВО газа (графоаналитический метод № 2)

Наименование серии АД	Уравнение аппроксимирующей линии тренда	Величина достоверности аппроксимации линии тренда	$\Delta P_{\text{мех}}$ , Вт	$k$	$J$ , кг•м <sup>2</sup>
ВАСО4-37-24	$6\text{E}-10x^6 - 4\text{E}-07x^5 + 8\text{E}-05x^4 - 0,0081x^3 + 0,447x^2 - 13,617x + 243,01$	0,9989	609,1	13,61	44,75
ВАСО16-14-24	$-3\text{E}-10x^6 + 2\text{E}-08x^5 + 2\text{E}-05x^4 - 0,0042x^3 + 0,36x^2 - 14,043x + 249,23$	0,9937	624,7	14,04	44,49

Расчетные данные показали, что ПМИ для ВАСО4-37-24 находится в диапазоне 44,75...46,73 кг•м<sup>2</sup>, для ВАСО16-14-24 в диапазоне 44,49...45,11 кг•м<sup>2</sup>.

### 2.1.2.2. Расчетно-экспериментальное исследование переходного процесса при запуске

Исследование электромагнитных процессов при запуске осуществлялось поочередно для АД серий ВАСО16-14-24, ВАСО4-37-24, в зимний период эксплуатации (температура наружного воздуха минус 25, давление 767 мм.рт.ст., сила ветра 0-1 м/с). АВО газа проработали не менее пяти минут в повторно-кратковременном режиме перед началом эксперимента, эффект авторотации от соседних работающих вентиляторов на исследуемых АД отсутствовал. Исследуемые АД соединены с клеммами магнитных пускателей, расположенных на панели управления АВО газа в КТП напряжением 6/0,4 кВ, КЛ марки АВВГ 4×50. Удельное активное и индуктивное сопротивление КЛ при плюс 20°С составляет 0,64 Ом/км и 0,0625 Ом/км соответственно [63]. Длина и активное сопротивление КЛ составляет: 25 м и 0,016 Ом (ВАСО16-14-24), 30 м и 0,0192 Ом (ВАСО4-37-24). Индуктивным сопротивлением КЛ пренебрегаем ввиду его малого значения. Компенсация реактивной мощности осуществляется от батарей статических конденсаторов (БСК) типа КЭ2-0,38-36-3У3 номинальной мощностью 36 кВАр, установленных в КТП. БСК подключена с помощью болтового соединения на отходящих контактах магнитного пускателя. Пуск АД производится непосредственно перед АВО газа вручную, останов производится с пульта управления сменным персоналом. Угол атаки лопастей вентилятора выставлен в соответствии с нормативно-техническими требованиями для зимнего периода эксплуатации. Электроснабжение ЭТК АВО газа осуществляется от масляного трансформатора типа ТМЗ-1600/6.

Регистрация тока в переходных динамических режимах производилась с помощью портативной цифровой USB приставки-осциллографа серии HANTEK 6022BE и токовых клещей HOLDPEAK-605A. Технические характеристики приборов приведены в таблицах 2.16-2.17.

Таблица 2.16 – Технические характеристики токовых клещей HOLDPEAK-605A

Параметр	Значение
Выбор пределов измерений	автоматический
Постоянный ток (DC)	600А
Переменный ток (AC)	600А
Разрешение	1 мВ / 1 А
Выходное сопротивление	10 кОм
Питание	батарея 9 В (6F22)

Таблица 2.17 – Технические характеристики осциллографа Hantek 6022BE

Параметр	Значение
Число каналов	2
Полоса пропускания	при 20мВ,50мВ,100мВ /деление - 5 МГц; при 200мВ / деление - 10 МГц; при 500мВ, 1В, 2В, 5В - 20 МГц
Частота дискретизации	48 МГц (48 Мвыб./с) в одноканальном режиме; 24 МГц (24 Мвыб/с) в двухканальном режиме
Размер оперативной памяти	1нс-2мкс – 1Кб; 5мкс-2мс – 128Кб; 5мс-20мс – 512Кб; 50мс-5000с – 1Мб
Максимальная амплитуда сигнала	±4.5В
Импеданс	1 Мом; 25пФ
Режим входа	только открытый (DC)
Защита входа	35В максимально
Диапазоны	20 мВ-5В, 8 шагов

Параметр	Значение
Точность по постоянному току	$\pm 3\%$
Временные диапазоны	1 нс-5000с
Виды синхронизации	По растущему фронту, по спадающему фронту
Питание	USB

Подключенные приборы во время проведения эксперимента показаны на рисунке 2.22. Схема подключения измерительных приборов показана на рисунке 2.23. Результаты измерения сигнала от токовых клещей после подачи напряжения через автоматический выключатель на магнитный пускатель передаются через USB-порт на ноутбук в виде массива данных, который отображается в компьютерной программе с помощью осциллограммы. Регистрация выбега АД на номинальный режим работы фиксировался с помощью встроенного счетчика времени Trigger.

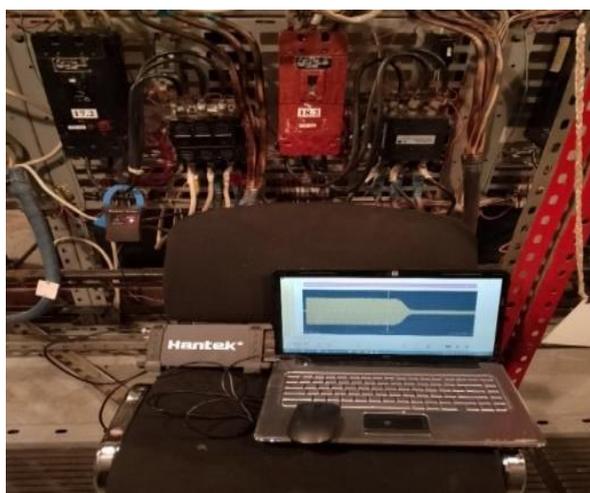


Рисунок 2.22 – Панель управления ЭТК АВО газа с подключенными приборами

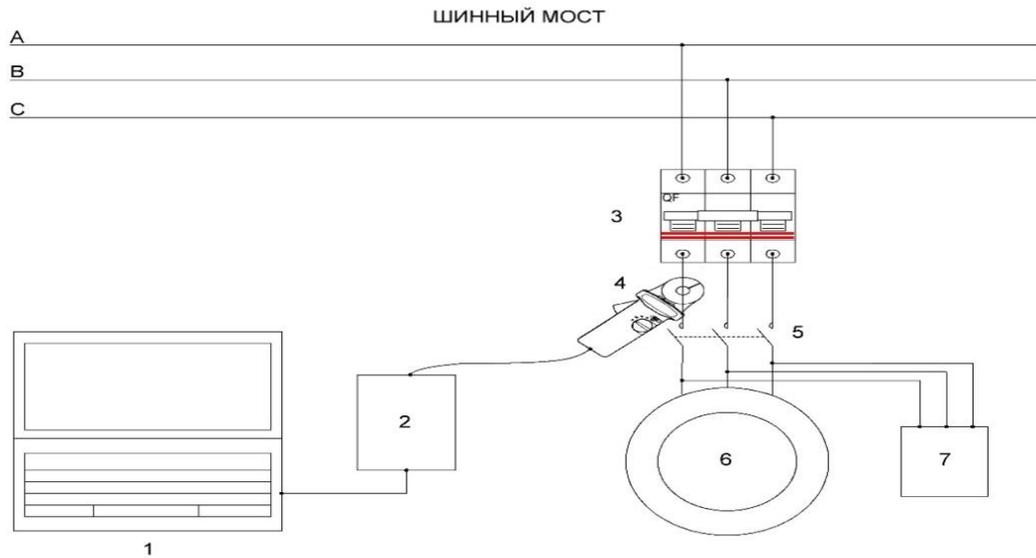


Рисунок 2.23 – Схема проведения эксперимента:

1 – ноутбук; 2 – осциллограф; 3 – автоматический выключатель;  
4 – токовые клещи; 5 – магнитный пускатель; 6 – АВО газа; 7 – БСК

На рисунках 2.24-2.55 показаны осциллограммы тока при прямом пуске АД серии ВАСО с вентиляторами на валу.

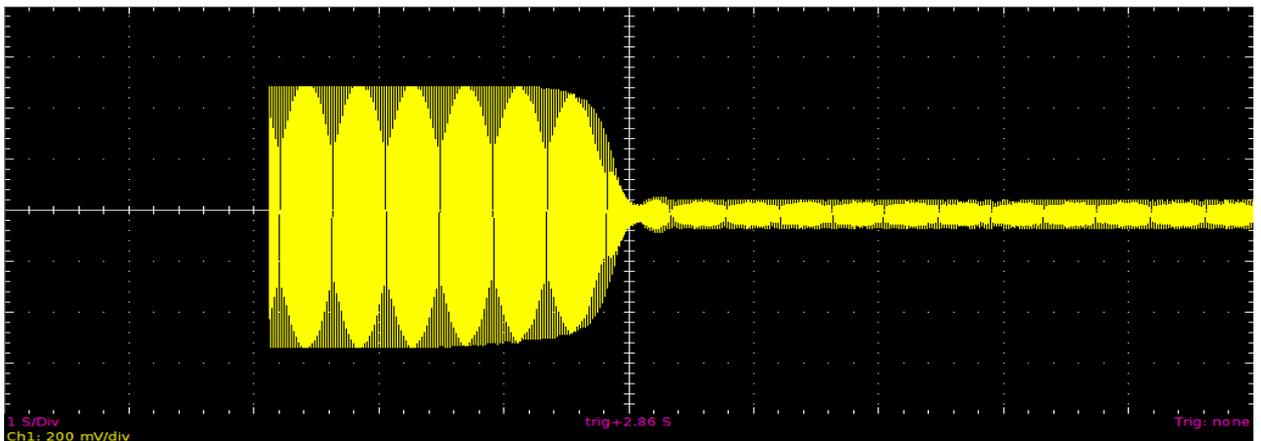


Рисунок 2.24 – Осциллограмма тока при пуске АД серии ВАСО4-37-24 с вентилятором на валу

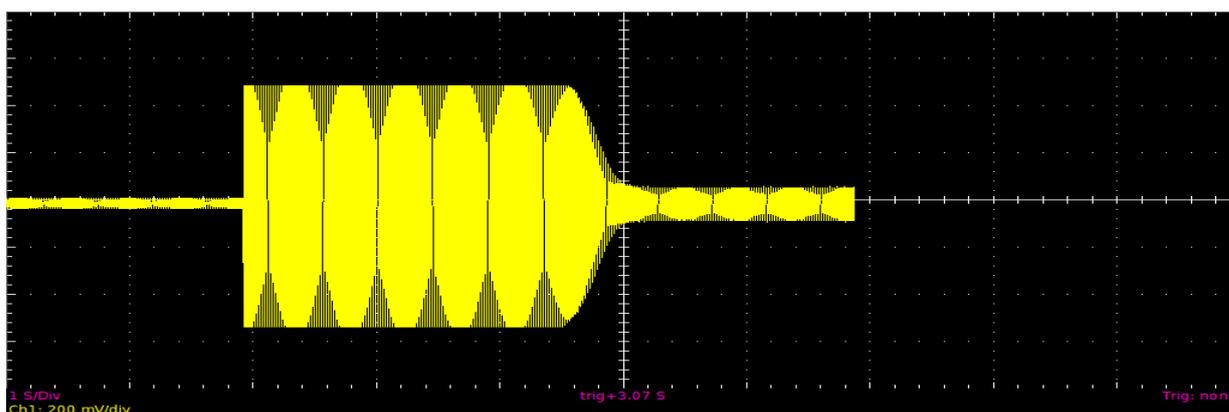


Рисунок 2.25 – Осциллограмма тока при пуске АД серии ВАСО16-14-24 с вентилятором на валу

В результате эксперимента были получены времятоковые характеристики (таблица 2.18).

Таблица 2.18 – Времятоковые характеристики АД серии ВАСО со стеклопластиковым рабочим колесом типа ГАЦ-50-4М2

Параметр	ВАСО4-37-24	ВАСО16-14-24
Пусковой ток, А	515	495
Ток нагрузки, А	59,5	68,75
Кратность тока	8,65	7,2
Время переходного процесса, с	2,86	3,07

## 2.2. Экспериментальная модель ЭТК АВО газа с централизованной СЭС

В ходе исследования в программной среде MATLAB/SIMULINK была разработана модель ЭТК АВО газа с централизованной СЭС на основе каталожных (паспортных) и расчетно-экспериментальных данных его отдельных элементов [66] (рисунки 2.26-2.27).

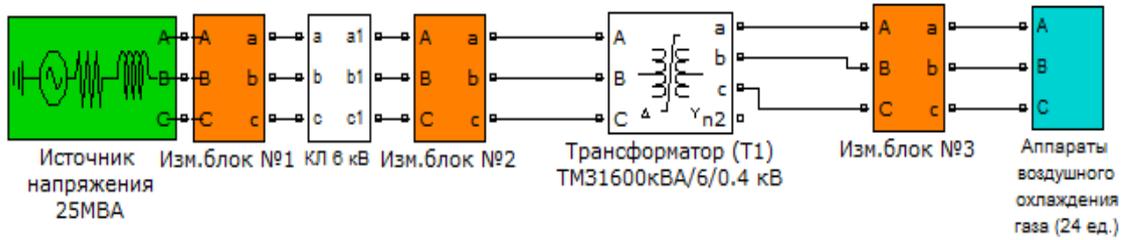


Рисунок 2.26 – Модель ЭТК АВО газа с централизованной СЭС

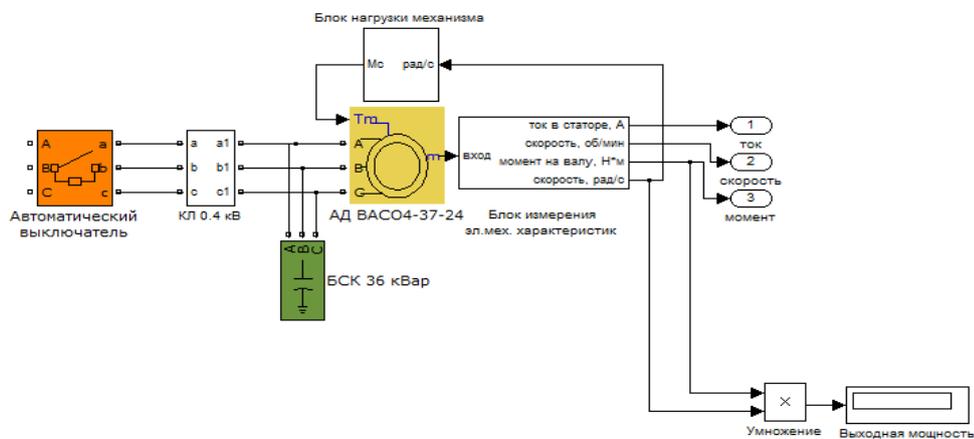


Рисунок 2.27 – Элемент модели АВО газа (1 ед.)

Подставляя момент инерции из таблиц (2.14-2.15), в окно настроек модели ЭТК АВО газа [67] программного комплекса MATLAB/SIMULINK получаем решение для пусковых характеристик АД серии ВАСО4-37-24 (рисунок 2.28) [68]. Полученные решения показывают, что АД по расчетным данным разгоняется на 25-40 % быстрее, чем по остальным методикам, основанных на экспериментальных данных. Между графоаналитическим методом №1 и №2 разница по времени разгона составляет не более 6 %.

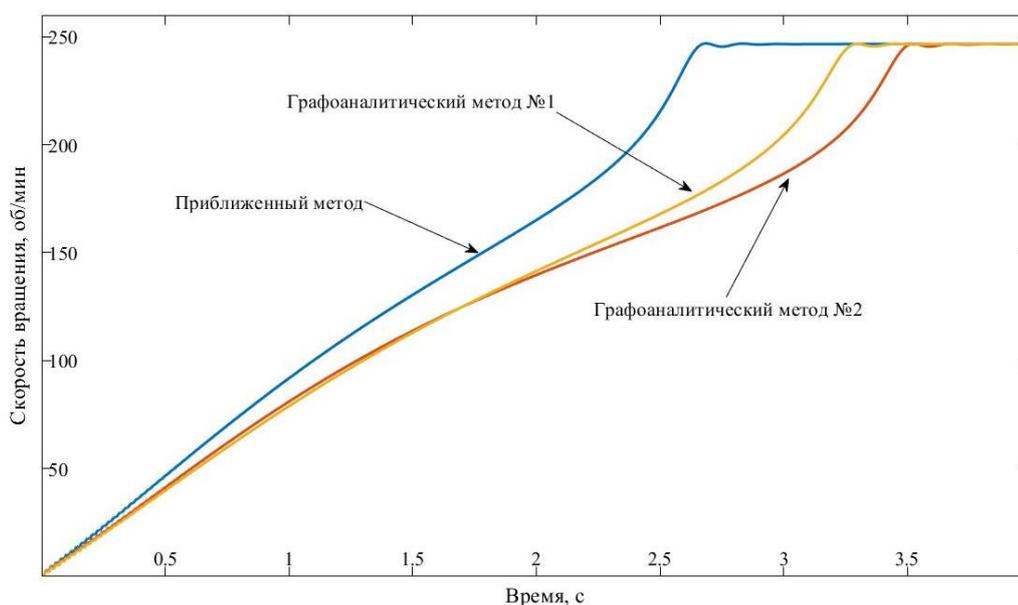


Рисунок 2.28 – Кривые разгона АД ВАСО4-37-24

Полученное значение времени переходного процесса из таблицы 2.18 было использовано для определения ПМИ вращающихся частей системы «АД – рабочее колесо» ЭТК АВО газа на разработанной компьютерной модели. Полученные значения ПМИ на компьютерной модели были сравнены (таблица 2.19) с расчетно-экспериментальными методами и расчетными данными.

Таблица 2.19 – Сравнение результатов значения ПМИ из расчетно-экспериментальных методик и расчетных данных с компьютерной моделью

Значение ПМИ, кг·м <sup>2</sup>	ВАСО4-37-24	ВАСО16-14-24
Компьютерная модель (а)	47,6	48,1
Графоаналитический метод №1 (b)	46,73	45,11
Графоаналитический метод №2 (b)	44,75	44,79
Расчетные данные (b)	34,72	
Разница (a-b)/a, %	1,83/5,99/27,06	6,21/6,88/27,82

Сравнительный анализ показал сходимость результатов значений ПМИ компьютерной модели с графоаналитическими методами в диапазоне до 7%. Разница между значением ПМИ компьютерной модели и расчетных данных составила до 28%, что говорит о несоответствии (или необходимости изменения коэффициентов) формулы из источника [62] для ЭТК АВО газа со стеклопластиковым рабочим колесом. При подстановке усредненных значений ПМИ из рассмотренных расчетно-экспериментальных методик в окно настроек модели ЭТК АВО газа в компьютерной программе MATLAB/SIMULINK были получены разгонные характеристики для АД серий ВАСО16-14-24 и ВАСО4-37-24 со стеклопластиковым рабочим колесом типа ГАЦ-50-4М2 на валу с прямой системой пуска.

В соответствии с полученными данными, были получены энергетические характеристики модели ЭТК АВО газа (таблица 2.20-2.21).

Таблица 2.20 – Энергетические характеристики модели ЭТК АВО газа (1 ед.)

Параметры	Изм. блок №1	Изм. блок №2	Изм. блок №3	Изм. блок №4
Активная мощность, Вт	40260,19	40257,81	38012,20	37055,22
Реактивная мощность, ВАр	32317,34	33199,55	12157,10	12063,88
Полная мощность, ВА	51626,48	52181,42	39908,93	38969,56
Коэффициент мощности ( $\cos\varphi$ )	0,78	0,77	0,95	0,95
Коэффициент реакт. мощности ( $\tan\varphi$ )	0,8	0,82	0,32	0,33
Потери активной мощности в АД, Вт/КПД, %	2495,22/93,26			
Потери полной мощности в КЛ 0.4кВ, Вт/ КПД, %	939,37/97,64			
Потери полной мощности в тр-ре, Вт/ КПД, %	12272,49/76,48			
Коэффициент загрузки тр-ра, %	2,49			
Потери полной мощности в КЛ 6кВ, Вт/ КПД, %	554,94/98,93			

Таблица 2.21 – Энергетические характеристики модели ЭТК АВО  
газа для одной СШ (24 ед.)

Параметры для группы АД (24 ед.)	Изм. блок №1	Изм. блок №2	Изм. блок №3	Изм. блок №4
Активная мощность, Вт	919451,91	918625,6	911163,94	38063.08
Реактивная мощность, ВАр	336342,31	336924,38	290614,94	12129.73
Полная мощность, ВА	979039,3	978463,61	956387,36	39949,07
Коэффициент мощности (cosφ)	0,94	0,94	0,95	0,95
Коэффициент реакт. мощности (tanφ)	0,37	0,37	0,32	0,32
Потери активной мощности в АД, Вт/ КПД, %	3543,08/90,69			
Потери полной мощности в тр-ре, Вт/ КПД, %	22076,25/97,74			
Коэффициент загрузки тр-ра, %	59,77			
Потери полной мощности в КЛ 6кВ, Вт/ КПД, %	575,69/99,94			

## Выводы по второй главе

1. Разработана структурная схема модели для ЭТК ГП, которая разбивается на элементы и измерительные блоки, необходимая при построении блоков модели в программном комплексе MATLAB/Simulink.

2. Произведен расчет параметров схемы замещения трансформатора в именованных единицах [50], которые показали высокую сходимость (относительная погрешность не более 3 %) с паспортными данными трансформатора. Разработана компьютерная модель для проверки рассчитанных параметров трансформатора по каталожным данным.

3. Выполнен расчет параметров схем замещения источника электроэнергии газового промысла, кабельных линий высокого и низкого напряжения по паспортным (каталожным) данным в программной среде MATLAB/SIMULINK с целью повышения достоверности компьютерной модели с реальным объектом газового промысла.

4. Выполнены расчетно-экспериментальные исследования с целью определения времятоковых характеристик, времени выбега и ПМИ вращающихся частей системы «АД – рабочее колесо» АВО газа.

5. Впервые на основе расчетно-экспериментальных данных были получены зависимости для кривых свободного выбега и мощности потерь, определены времятоковые, разгонные характеристики и ПМИ для АД серий ВАСО16-14-24, ВАСО4-37-24 со стеклопластиковым рабочим колесом типа ГАЦ-50-4М2 на валу.

6. Разработана компьютерная модель ЭТК газового промысла с централизованной СЭС. Сравнительный анализ показал сходимость результатов значения времени разгона асинхронного двигателя серии ВАСО16-14-24 (ВАСО4-37-24) со стеклопластиковым рабочим колесом типа ГАЦ-50-4М2 на валу на разработанной компьютерной модели с экспериментальными данными в диапазоне до 6-7%, что говорит о высокой степени достоверности модели к реальному объекту газового промысла.

## ГЛАВА III. РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИМ КОМПЛЕКСОМ АППАРАТОВ ВОЗДУШНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ ГАЗА

### Постановка задачи

Охлаждение газа является одним из важных этапов подготовки природного газа на УКПГ и ДКС ГП, которое осуществляется с помощью АВО газа, объединенных в единый ЭТК. При управлении режимами работы ЭТК АВО газа необходимо обеспечить: 1) требуемую температуру газа на выходе; 2) энергосберегающий режим работы АВО, т.к. около 40-70% расхода электроэнергии потребляется в наиболее загруженный период эксплуатации [69,78]. Кроме указанных задач, актуальной проблемой для районов Крайнего севера является обеспечение мероприятий по предотвращению образования гидратных пробок в теплообменных секциях АВО газа, которое в настоящее время определяется визуально и решается с помощью отогрева парогенераторной установкой или введением метанола, что является не всегда эффективным и приводит к отключению секции АВО газа до потепления [70]. Литературный и патентный анализ источников [70-72] показал, что эффективным способом решения указанных задач является использование и совершенствование систем автоматического управления. Внедрение САУ АВО газа обусловлено также стремлением заменить распространенный на ГП дискретный способ управления, заключающийся в ручном или дистанционном включении-отключении вентиляторов, число которых определяется оператором индивидуально [73]. Дискретный метод управления имеет ряд известных недостатков [74]: 1) низкая точность поддержания температуры; 2) большие длительные пусковые токи АД серии ВАСО, вызванные большим моментом инерции; 3) низкая энергоэффективность. Патентный поиск, проведенный в работах

[75-77] выявил тенденцию к замене прямых пусков АВО газа на частотно-регулируемый с помощью преобразователей частоты.

САУ АВО газа имеют ряд специфических особенностей, в частности, параметры объекта управления могут варьировать в значительных пределах из-за изменения внешних условий (особенно для районов Крайнего севера) и режима работы газопровода. Несмотря на значительное количество публикаций, ряд вопросов совершенствования САУ АВО газа с учетом отмеченных требований к качеству управления и специфических особенностей объекта до настоящего времени остаются открытыми. Указанные обстоятельства определяют актуальность проблемы совершенствования алгоритмов управления. Таким образом, в данной главе ставится задача разработки алгоритмов эффективного управления, внедрения аппаратных и программных средств, объединенных в единую систему автоматического управления, обеспечивающая поддержание технологического режима работы и его восстановление в течение наименьшего промежутка времени в аварийных режимах эксплуатации. с централизованной или автономной СЭС.

### **3.1. Аналитический обзор САУ АВО газа**

#### **3.1.1. Патентный обзор**

Из уровня техники известна система управления аппаратами воздушного охлаждения, содержащая блок задания температуры, регулятор, датчик температуры охлаждаемой среды, блок датчиков измерения внешних воздействий, теплообменники с вентиляторами, регулируемые электроприводы вентиляторов, а также сумматор, первый вход которого через датчик температуры охлаждаемой среды соединен с выходом теплообменников, а выход подключен через регулятор к входам

электроприводов, выход блока задания температуры соединен со вторым входом сумматора, при этом в систему введены блок расчета коэффициентов регулятора и блок анализа состояния электроприводов, блок расчета коэффициентов регулятора выполнен в виде последовательно соединенных блока фаззификации, блока нечеткого вывода с базой правил и блока дефаззификации, входами блока расчета коэффициентов регулятора являются входы блока фаззификации, а выходами – выходы блока дефаззификации, регулятор выполнен с входами для установки коэффициентов, электроприводы оснащены информационными выходами, входы блока расчета коэффициентов регулятора подключены к выходам блока датчиков измерения внешних воздействий и выходу блока анализа состояния электроприводов, выходы блока расчета коэффициентов регулятора подключены к входам регулятора для установки коэффициентов, входы блока анализа состояния электроприводов соединены с информационными выходами электроприводов (патент на полезную модель RU 124935, МПК F04D 27/00, опубликован 20.02.2013 г.). Недостатком данной полезной модели является использование в АВО многополюсных асинхронных двигателей во взрывозащищенном исполнении, которые могут длительно и надежно работать при частотном регулировании только в диапазоне до половины номинальной скорости вращения.

Известна также система управления аппаратами воздушного охлаждения, содержащая регулятор и датчик температуры охлаждаемой среды, вентиляторы с приводом, группу теплообменников, трубопроводы подвода к ним охлаждаемой среды и ее отвода в коллектор, из которого охлажденная среда поступает в отводящий трубопровод, при этом приводы имеют устройство изменения их частоты вращения, на вход которых поступает сигнал с выхода регулятора температуры, на первый вход регулятора поступает сигнал с датчика температуры, а на второй вход – сигнал о требуемой температуре охлаждаемой среды, причем в качестве привода вентиляторов используются асинхронные электродвигатели, частота

вращения которых изменяется устройством в виде преобразователя частоты тока питающей электродвигатели сети (патент на изобретение RU 2330993, МПК F04D 27/00, опубликован 10.08.2008 г.). Недостатком данного изобретения является отсутствие возможности подключения включенных электродвигателей вентиляторов к сети переменного тока для функционирования в рабочем режиме после осуществления запуска.

Известна система управления аппаратами воздушного охлаждения природного газа, содержащая частотно-регулируемый привод, блок обработки измерительной информации и автоматического управления, датчики температуры, электронный блок датчиков температуры, вычислительный блок, два исполнительных устройства, вентиляторы, при этом информация от датчиков температуры поступает через электронный блок в блок обработки измерительной информации и автоматического управления, блок обработки измерительной информации и автоматического управления на основании полученной информации определяет, какие вентиляторы необходимо использовать в работе, и посылает соответствующий управляющий электрический сигнал в вычислительный блок, с помощью вычислительного блока одно исполнительное устройство осуществляет запуск электродвигателей вентиляторов путем их поочередного подключения к частотно-регулируемому приводу и подключает к сети переменного тока, включенные в работу электродвигатели вентиляторов, а другое исполнительное устройство, контролируя температуру стенок теплообменных трубок во всех секциях аппарата воздушного охлаждения газа, подключает к частотно-регулируемому приводу электродвигатель вентиляции секции, в которой значение температуры стенок теплообменных трубок отличается от заданного значения, данное устройство по мере достижения температуры стенок теплообменных трубок выбранной секции АВО газа заданного значения отключает электродвигатель вентилятора от частотно-регулируемого привода и переводит его на сеть переменного тока, при необходимости

аналогичные операции производятся с электродвигателями других вентиляторов (патент на изобретение RU 2291474, МПК G05D 1/00, F28F 27/00, опубликован 10.01.2007). Недостатками системы являются:

- 1) отсутствие анализа состояния электродвигателей;
- 2) отсутствие возможности прямого запуска электродвигателей от автоматической системы управления АВО в случае перехода частотно-регулируемого привода в аварийный режим;
- 3) отсутствие системы автоматического группового запуска электродвигателей соответствующих вентиляторов в течение наименьшего промежутка времени с централизованной и автономной системой электроснабжения.

### 3.1.2. Промышленные САУ

Программно-технические решения для управления ЭТК АВО газа на российском рынке представлены следующими компаниями [78-83]: Прософт-Системы (г. Екатеринбург), НПО «Газтехмаш» (г. Жуковский), ОАО «Чебоксарский электроаппаратный завод» (г. Чебоксары), АО «Борхиммаш» (г. Борисоглебск), НПО «Каскад групп» (г. Чебоксары), ООО «Прибор» (г. Смоленск).

САУ АВО газа производства НПО «Каскад групп» (рисунок 3.1) содержит в своем составе: 1) шкаф управления контроллерный; 2) щиты силовые, включающие также устройства плавного пуска или преобразователи частоты (зависит от модификации); 3) шкаф вибродиагностики. Система предназначена для автоматического поддержания заданной температуры газа, выходящего из агрегата воздушного охлаждения газа, с обеспечением поочередного плавного пуска электродвигателей вентиляторов АВО. При этом САУ позволяет оператору, посредством диспетчерской ЭВМ, панели оператора или переносного

(технологического) компьютера, осуществлять изменение задаваемых и контролируемых параметров, включать и останавливать любой электродвигатель, считывать текущие значения входной и выходящей температур газа, наблюдать за текущим состоянием любого электродвигателя, просматривать «электронный журнал» регистрации событий, с меткой времени, производить диагностирование аппаратуры.

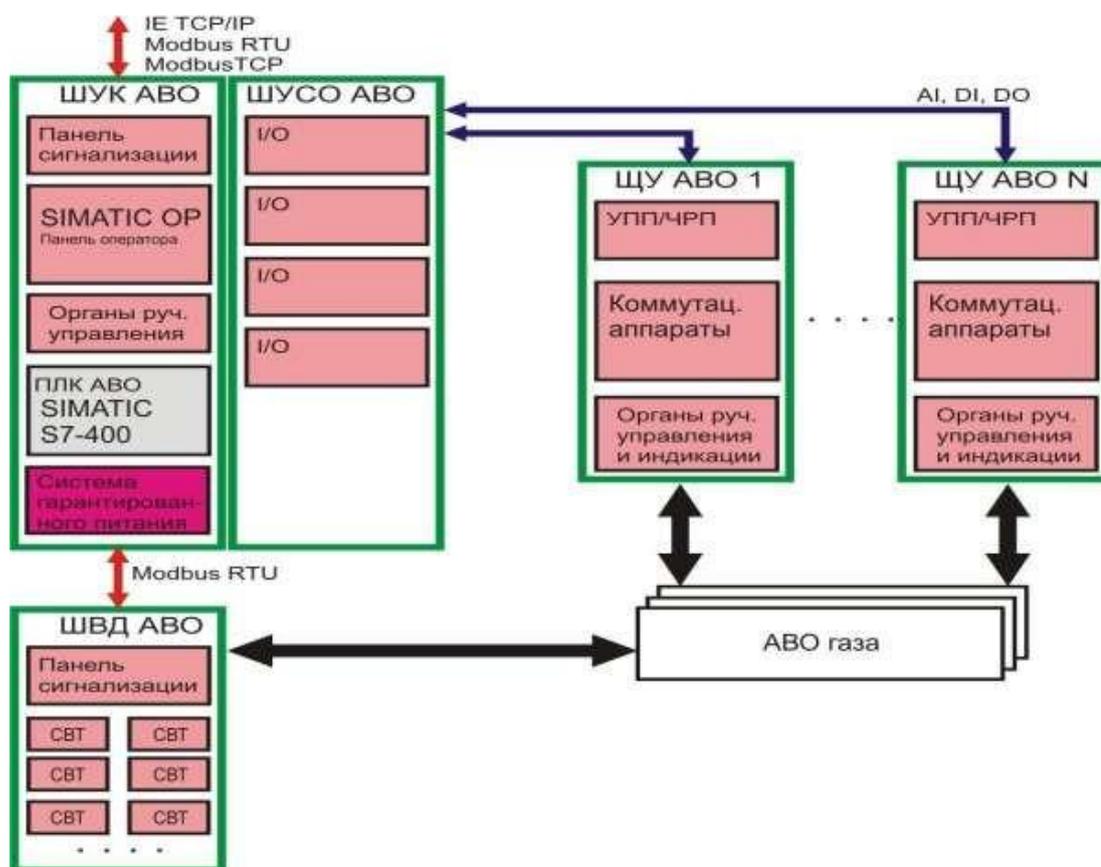


Рисунок 3.1. – Структура САУ АВО газа:

ШУК – шкаф управления контроллерный; ШУСО – шкаф удаленных модулей устройства сопряжения с объектом; ШВД – шкаф вибродиагностики; ЩУ – щиты силовые.

Основные функции, которые может реализовать САУ:

- 1) автоматическое регулирование температуры газа на выходе АВО;

2) многоточечный контроль температуры выходных участков нижнего ряда теплообменных трубок и выходных коллекторов каждой секции АВО для предупреждения гидратообразования;

3) защита от образования гидратов с помощью реверса технологического потока от верхних («теплых») рядов теплообменных трубок;

4) контроль температуры окружающего воздуха;

5) автоматическое отключение электродвигателей вентиляторов АВО при превышении допустимого уровня вибрации;

6) ограничение величины пускового тока электродвигателей (плавный пуск) с обеспечением бестоковой коммутации магнитных пускателей;

7) программный, последовательный плавный запуск группы электродвигателей при одновременном включении их в работу;

8) типовые защиты электропривода во время плавного пуска;

9) технологические защиты и блокировки после разгона двигателя до номинальной скорости и подключения его непосредственно к питающей сети;

10) обеспечение равномерной выработки ресурса всеми электродвигателями;

11) создание и хранение в энергонезависимой памяти электронного «журнала событий» по отказам и времени работы каждого электродвигателя;

12) информационный обмен с системой верхнего уровня АСУТП по сети Industrial Ethernet и работа с технологическим ПК;

13) визуализация параметров работы АВО на локальной панели оператора;

14) аварийно-предупредительная сигнализация отказов и отклонений.

Основными недостатками данной системы является применение комплектующих преимущественно иностранного производства.

САУ АВО газа производства «Прософт-Системы» функционирует по централизованно-распределенному принципу (рисунок 3.2). В составе

оборудования входят контроллер, в котором реализованы все алгоритмы управления, различные датчики технологических параметров, а также кабельная продукция. Для обеспечения вибрационной защиты двигателей вентиляторов САУ АВО комплектуется цифровой аппаратурой контроля вибрации (ЦВА). Отличительной особенностью САУ производства «Прософт-Системы» является применение блоков рециркуляции нагретого воздуха, которое осуществляется с помощью шести вентиляторов и трех групп жалюзи: входных, выходных и переточных.

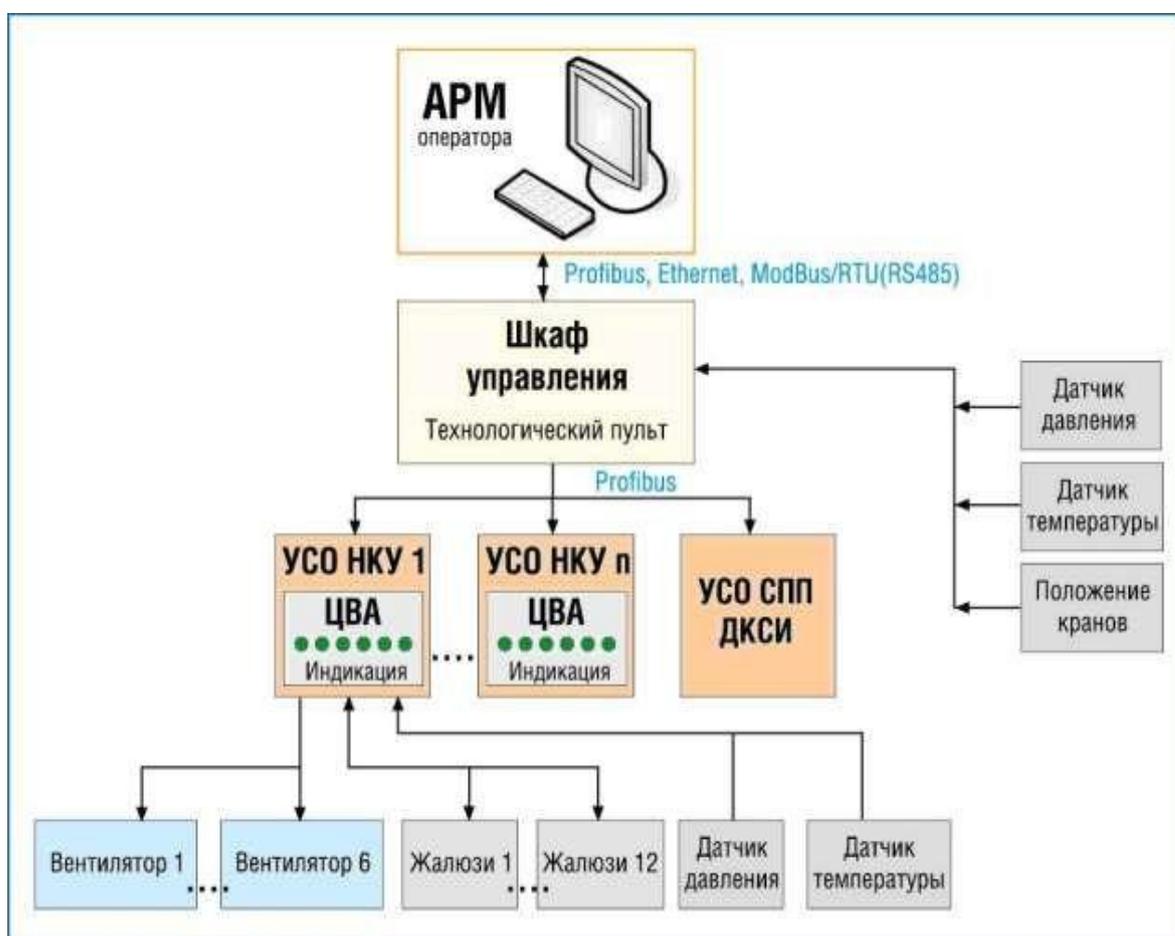


Рисунок 3.2 – Структура САУ АВО газа:

АРМ – автоматизированное рабочее место оператора;  
 УСО – универсальное сервисное оборудование; НКУ – низковольтные коммутационные устройства; СПП – стартер плавного пуска;  
 ДКСИ – допусковый контроль сопротивления изоляции.

Недостатками данной системы являются: 1) возможная рассогласованная работа двух регуляторов: необходимо снижать температуру газа на выходе и поддерживать температуру теплообменных трубок выше температуры гидратообразования; 2) повышенные габаритно-массовые характеристики шкафов; 3) высокая стоимость оборудования.

САУ АВО газа производства «Борхимаш» (рисунок 3.3) предназначена для управления технологическим процессом охлаждения продуктов газовой и нефтяной промышленности, для контроля и визуализации технологического процесса охлаждения и параметров работы установки.

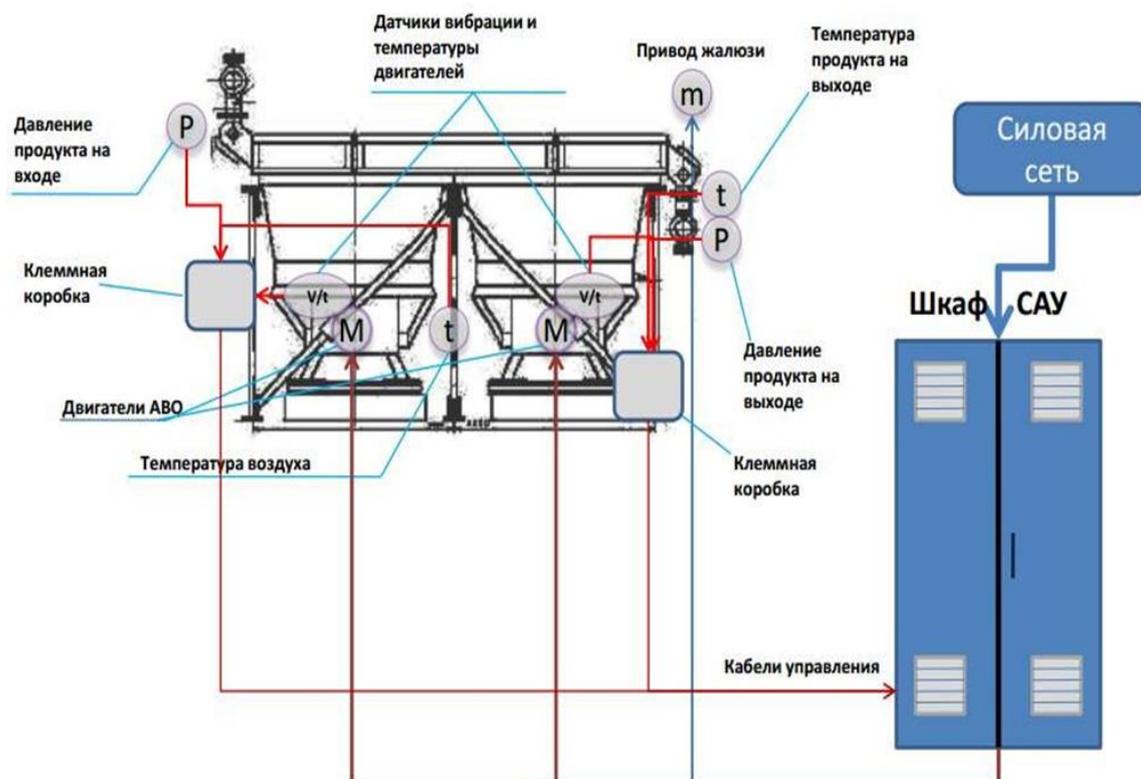


Рисунок 3.3 – Структура САУ АВО газа

Состав САУ:

- 1) пускозащитные комплектующие – автоматы защиты;

2) силовая регулирующая часть - преобразователи частоты и устройства плавного пуска;

3) пускозащитные комплектующие – контакторы и тепловые реле;

4) клеммные колодки;

5) контроллер.

Функции САУ АВО газа:

1) предпусковой контроль электродвигателей;

2) поддержание заданной температуры продукта на выходе контура охлаждения;

3) контроль давления продукта в АВО;

4) управление отсечными кранами в технологической обвязке АВО;

5) равномерная выработка ресурса электродвигателями;

6) пуск/остановка необходимого количества вентиляторов;

7) контроль параметров подходящей и отходящей сети;

8) блокировки и защита технологического оборудования АВО;

9) перезапуск электродвигателей при работе от ДЭС;

10) остановка вентиляторов АВО газа при АО КЦ;

11) бесперебойное питание САУ АВО при пропадании основного и резервного питания;

12) пуск/остановка вентиляторов АВО при отключенном шкафе управления САУ АВО;

13) взаимодействие с АСУ ТП.

Недостатком САУ АВО газа производства «Борхимаш» является отсутствие системы защиты от гидратообразования.

САУ АВО газа производства ООО «Прибор» предназначена для контроля параметров и автоматического управления двигателями вентиляторов аппаратов воздушного охлаждения. Система обеспечивает мягкий безударный пуск и останов двигателей; управление; необходимые электрические и технологические защиты агрегатов; индикацию режимов работы; диагностику контролируемых механизмов; самодиагностику;

запоминание (архивирование) режимов работы и технологических параметров; связь с ЭВМ или контроллером верхнего уровня.

Основные функции:

- 1) управление: автоматическое, ручное, дистанционное;
- 2) автоматическое регулирование температуры выхода продукта: посредством изменения частоты вращения вентилятора и / или отключения двигателя; посредством закрытия или открытия боковых жалюзи и изменения угла поворота лопаток верхних жалюзи (изменение внешнего потока воздуха); посредством включения подогревателя воздуха; посредством включения увлажнителя;
- 3) измерение и регистрация давления на входе в АВО;
- 4) измерение и регистрация вибрации электродвигателей;
- 5) автоматическое отключение электродвигателя при достижении уровня вибрации выше допустимого значения. Диагностика, сигнализация, расшифровка и визуализация неисправности на мнемосхеме;
- 6) плавный пуск и останов двигателя;
- 7) динамическое торможение электродвигателей (при необходимости).
- 8) последовательный плавный пуск электродвигателей при восстановлении напряжения питания (после его кратковременного останова);
- 9) программное временное изменение напряжения питания электродвигателей;
- 10) типовые электрические защиты;
- 11) технологические защиты и блокировки;
- 12) защита электродвигателя: от неправильного чередования фаз; при исчезновении фазы питающего напряжения; от превышения отклонений питающей сети от заданной нормы; максимальная токовая защита; времятоковая защита запускаемого электродвигателя;
- 13) контроль готовности электродвигателя к пуску;
- 14) наблюдение за текущим состоянием любого электродвигателя;

15) создание и хранение электронного архива («журнала событий»);

Недостатком системы является отсутствие алгоритмов работы с ТДА в летнем режиме эксплуатации.

САУ АВО газа производства НПО «Газтехмаш» (рисунок 3.4) предназначены для индивидуального регулирования частоты тока и напряжения питания электродвигателей вентиляторов УОГ. НКУ АВО газа - частотно-регулируемый привод (ЧРП) обеспечивают изменение скорости вращения электродвигателей для изменения производительности вентиляторов УОГ. НКУ АВО газа - ЧРП поддерживают с высокой точностью в автоматическом режиме заданную температуру газа на выходе УОГ, с обратной связью по величине токового сигнала, поступающего с датчиков температуры газа (термопреобразователи с токовым выходом), установленных в выходном коллекторе УОГ и на выходе каждого аппарата. НКУ АВО газа-

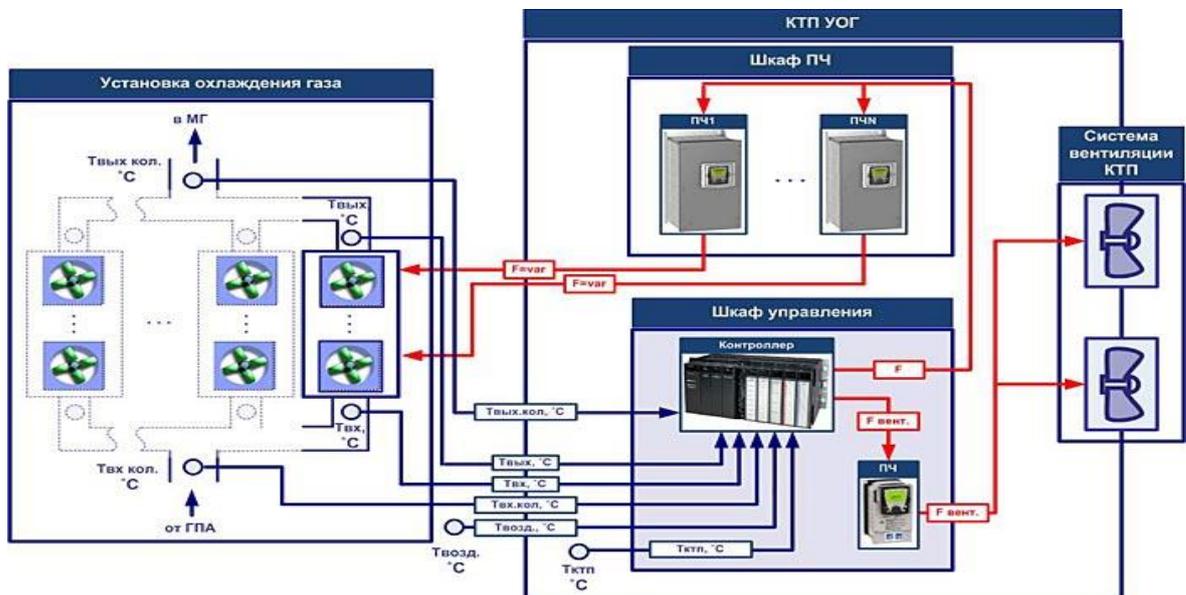


Рисунок 3.4 – Структура САУ АВО газа:

ГПА – газоперекачивающий агрегат

Отличительной особенностью САУ является способность работать с различными типами и сериями АВО газа (таблица 3.1).

Таблица 3.1 – Таблица базовых конфигураций

Тип АВО	кол-во АВО, ед.	Мощность, кВт	Общее кол-во, ед.	Кол-во АВО в составе УОГ, ед.	Метод регулирования
2АВГ-75	2	37	8-36	4-18	И, Г
"Айсберг"	6	13	6-96	1-16	И, Г, К (1/3,2/3)
АВГ-МГ	6	9	6-96	1-16	И, Г, К (1/3,2/3)
АВГ-85МГ	6	6	6-96	1-16	И, Г, К (1/3,2/3)

Где И - индивидуальное управление (отдельный частотный преобразователь на каждый двигатель); Г - групповое управление (один частотный преобразователь полной мощности на группу 2 или 3 двигателя); К - комбинированное управление (один частотный преобразователь единичной или двойной мощности на три двигателя).

Недостатком системы является отсутствие алгоритмов работы с системами плавного пуска.

САУ АВО газа производства ОАО «Чебоксарский электроаппаратный завод» (рисунок 3.5) обеспечивает автоматическое управление работой группы асинхронных электродвигателей в составе единого технологического комплекса.

Основные функции:

- 1) регулирование и поддержание заданной температуры перекачиваемого газа;
- 2) плавный пуск и останов любого двигателя из группы по командам системы;
- 3) последовательный программный плавный запуск электродвигателей при включении в работу;
- 4) обеспечение равномерной выработки ресурса электродвигателей;
- 5) контроль параметров питающей сети;
- 6) контроль обрыва фазы со стороны двигателей;
- 7) создание, ведение и хранение электронного журнала событий о работе САУ АВО;

Основными недостатками САУ являются: большие массогабаритные показатели и применение комплектующих иностранного производства.

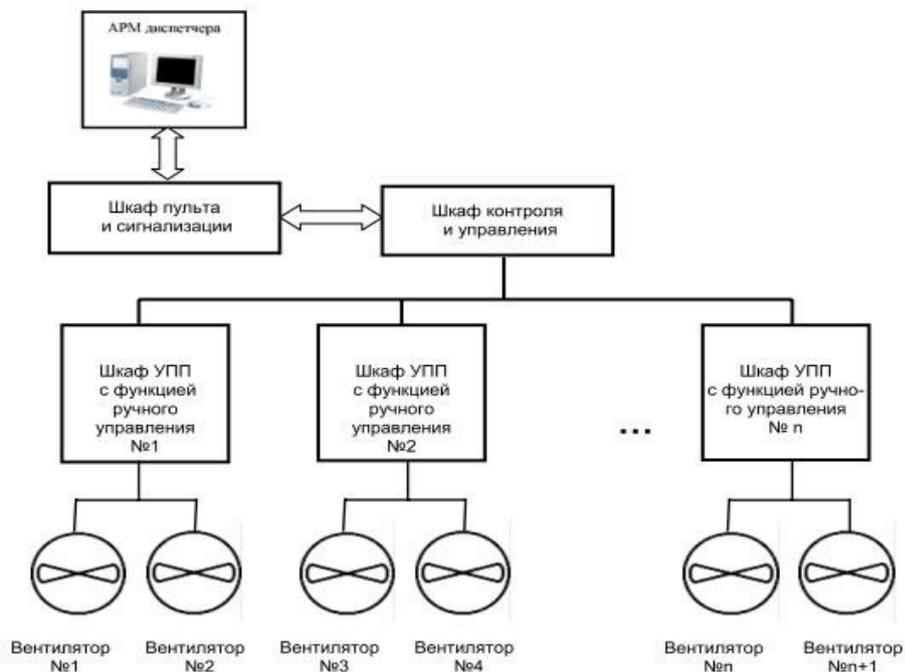


Рисунок 3.5 – Структура САУ АВО газа

Аналитический обзор САУ АВО газа, представленных на российском рынке, показал, что системы схожи по структуре и функциональным

возможностям, основной целью которых является поддержание температурного режима в выходном коллекторе АВО газа. Основным вариантом построения схемы электроснабжения и управления вентиляторами АВО газа осуществляется с помощью частотного регулирования (ЧР) по схеме: «один ПЧ – один вентилятор» или «один ПЧ – группа вентиляторов». Однако построение САУ с использованием комбинированного или смешанного управления (ПЧ + системы плавного пуска) не рассматривается, хотя экономически она более выгодна [84], особенно на этапе модернизации ЭТК газового промысла. Обзор промышленных САУ не выявил варианта подключения дополнительной турбохолодильной техники (например, турбодетандерных агрегатов) при полной загрузке вентиляторов АВО газа в наиболее жаркий период эксплуатации ЭТК. Недостаточное охлаждение газа в районах вечной мерзлоты способно вызвать нештатное изменение трубопровода и повлиять на безопасность технологического процесса в целом [85].

Таким образом, для современных систем автоматического управления охлаждения газа ставится нетривиальная задача обеспечения не только температурного режима в выходном коллекторе газа, но также гибкое управление режимами работы, обеспечение различных видов защит и управление вспомогательным оборудованием, для чего необходимо разработать алгоритмы эффективного управления всем комплексом охлаждения газа.

## **3.2. Разработка САУ АВО газа**

### **3.2.1. Трехуровневый комплекс**

Предлагаемая САУ АВО газа спроектирована в виде трехуровневой структуры (рисунок 3.6). Нижний уровень содержит датчики: температуры

газа на каждой секции и коллекторе (вход и выход), сопротивления изоляции АД, угла поворота механизма жалюзи, параметров сетевого напряжения и тока. Исполнительные устройства: АД, контакторы, СПП, ПЧ, КРМ, КАЦС, жалюзи. К среднему уровню относятся программно-аппаратные модули: ПЛК, БП. Верхний уровень представляет собой автоматизированное рабочее место (АРМ) оперативного персонала, которое реализовано в виде УК.

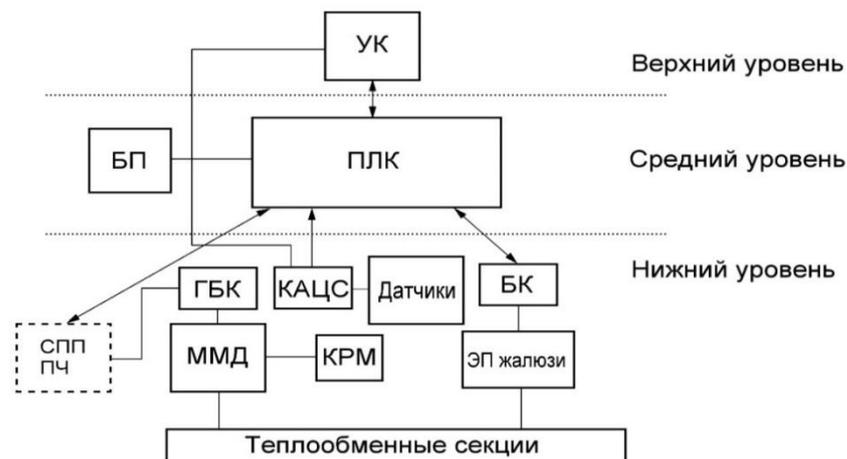


Рисунок 3.6 – Структурная схема трехуровневого комплекса САУ АВО газа:

БП – блок питания; ПЛК – программируемый логический контроллер;

ГБК – группа блочных контакторов; БК – блок-контактор;

ЭП – электропривод.

Структурную схему САУ, на которую был получен патент [86] с использованием ПЧ, СПП или комбинированного метода (без использования жалюзи и ТДА) можно отразить на схеме (рисунок 3.7) с использованием следующих обозначений:

- 1) блок задания температуры;
- 2) блок обработки измерительной информации;
- 3) датчики температуры стенок теплообменных трубок АВО;
- 4) блок автоматического управления АВО;

5) исполнительное устройство, которое осуществляет плавный запуск электродвигателей соответствующих вентиляторов путем их подключения к частотно-регулируемому приводу и подключение к сети переменного тока включенных электродвигателей вентиляторов для функционирования в рабочем режиме;

б) исполнительное устройство, которое осуществляет переключение частотно-регулируемого привода в режим автоматического поддержания заданной температуры стенок теплообменных трубок АВО;

7) частотно-регулируемый привод;

8) асинхронные электродвигатели;

9) теплообменник;

10) блок переключения на прямой пуск электродвигателей;

11) система управления частотно-регулируемым приводом;

12) блок анализа состояния электродвигателей;

13) блок, запоминающий предыдущий режим работы вентиляторов до отключения электропитания;

14) вычислительный блок алгоритма групповых пусков;

15) блок вывода информации токов электродвигателей соответствующих вентиляторов и номинального тока источника электроснабжения;

16) блок автоматического группового запуска электродвигателей соответствующих вентиляторов.

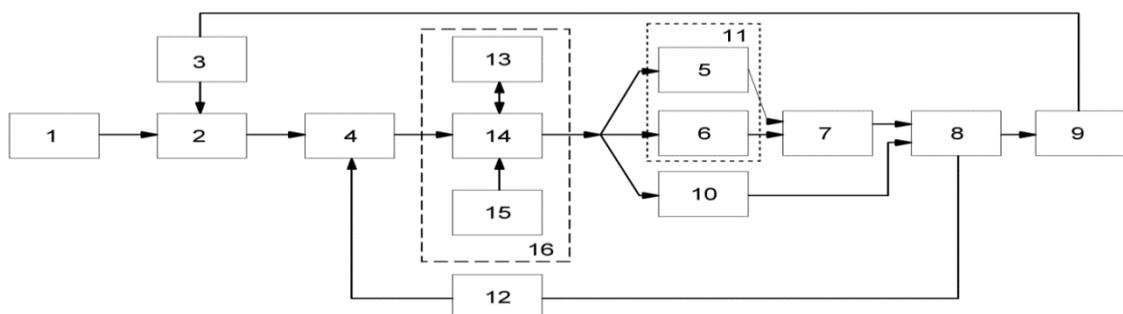


Рисунок 3.7 – Схема САУ АВО газа

Изобретение относится к автоматизации технологических процессов охлаждения природного газа с применением АВО газа и может быть использовано на дожимных компрессорных станциях и установках комплексной подготовки природного газа для поддержания требуемого режима работы АВО и восстановления технологического режима в течение наименьшего промежутка времени с централизованной и автономной СЭС.

САУ АВО газа функционирует следующим образом.

На блок обработки измерительной информации (2) с блока задания температуры (1) поступает задание о поддержании определенной температуры на теплообменниках (9). Данные о фактической температуре охлаждаемого природного газа поступают с датчиков температуры стенок теплообменных трубок АВО (3) на блок обработки измерительной информации (2). Из блока обработки измерительной информации (2) сигнал о необходимой корректировке температуры поступает на блок автоматического управления АВО (4), который определяет, какие вентиляторы необходимо использовать в работе в зависимости от информации о фактическом состоянии асинхронных электродвигателей (8), поступающей с блока анализа состояния электродвигателей (12). Из блока автоматического управления АВО (4) поступает соответствующий управляющий электрический сигнал на блок автоматического группового запуска (АГЗ) электродвигателей соответствующих вентиляторов (16). Блок АГЗ электродвигателей соответствующих вентиляторов (16) состоит из блока (13), запоминающего предыдущий режим работы вентиляторов до отключения электропитания, вычислительного блока алгоритма групповых пусков (14), где формируется задание на осуществление групповых пусков (по одному, два, три и т.д.) с различным временным шагом включения асинхронных электродвигателей (8) в работу, и блока вывода информации токов электродвигателей соответствующих вентиляторов и номинального тока источника питания (15). На вычислительный блок алгоритма групповых пусков (14) поступает информация о токе асинхронных электродвигателей

(8) и о номинальном токе источника питания с блока (15), что позволяет производить групповые пуски без перегрузки централизованного или автономного источника питания. В аварийных режимах при кратковременном исчезновении напряжения на вычислительный блок алгоритма групповых пусков (14) поступает информация о предыдущем режиме работы вентиляторов с блока (13), что позволяет оптимизировать режим пуска АВО во время восстановления питания. При нормальном режиме эксплуатации сигнал с блока (16) поступает в систему управления частотно-регулируемым приводом (11), где с помощью исполнительного устройства (5) осуществляется плавный запуск электродвигателей выбранных вентиляторов путем их группового подключения к частотно-регулируемому приводу (7) и подключение к сети переменного тока всех включенных в работу электродвигателей вентиляторов. После перехода всех вентиляторов в рабочий режим с помощью исполнительного устройства (6) осуществляется переключение (при необходимости) частотно-регулируемого привода (7) в режим автоматического поддержания заданной температуры стенок теплообменных трубок АВО. При аварийных режимах эксплуатации (исчезновение напряжения, поломка частотно-регулируемого привода (7)) сигнал с блока (16) подается на блок переключения на прямой пуск электродвигателей (10), что позволяет произвести пуск асинхронных электродвигателей в течение наименьшего промежутка времени после восстановления питания.

Предложенная система управления АВО природного газа, представляющая собой надежную в работе комбинированную схему каскадно-группового управления АВО, обеспечивает: высокое качество регулирования температуры охлаждаемой среды в широком диапазоне изменений климатических условий, увеличение надежности функционирования АВО за счёт анализа состояния электродвигателей и возможности прямого пуска, совершенствование восстановления технологического режима при исчезновении напряжения или неисправности

частотно-регулируемого привода с помощью блока АГЗ без перегрузки источника питания.

### 3.2.2. Трехступенчатая защита от гидратообразования

Для предотвращения образования гидратных пробок в теплообменных трубках АВО газа при температуре от минус 10°С до минус 50°С необходимо [22]:

- 1) контролировать температуру газа на выходе из АВО;
- 2) чередовать работу вентиляторов при понижении температуры газа на выходе из пары АВО (по сравнению с температурой в общем коллекторе на выходе из установки охлаждения газа);
- 3) изменять количество рабочих пар АВО;
- 4) при недопустимом снижении температуры газа после пары АВО (по отношению к остальным работающим парам) необходимо остановить вентиляторы данной пары, подать метанол;
- 5) количество и периодичность подачи метанола определяется условиями эксплуатации.

Предлагаемая защита от гидратообразования теплообменных трубок АВО газа осуществляется с помощью трех ступеней: 1) включение вентиляторов в секции в определенной последовательности; 2) использование жалюзи; 3) реверс. Так как порядок включения вентиляторов в секции АВО газа не регламентируется и определяется с учетом температурного режима [87], то был предложен порядок включения каждого вентилятора в секции АВО газа типа 2АВГ-75С, включенный в алгоритм САУ, который заключается во включении вентиляторов в следующей последовательности:

$$1_1 \dots N_1 \longrightarrow 1_2 \dots N_2 \longrightarrow 1_3 \dots N_3 \longrightarrow 1_4 \dots N_4, \quad (3.1)$$

где  $1_1$  – первый вентилятор первой секции;  $N_1$  – первый вентилятор  $N$ -ной секции.

Сущность порядка включения (3.1) заключается в последовательном запуске первых вентиляторов в каждой секции, затем вторых в каждой секции и т.д. (количество вентиляторов в секции зависит от типа АВО газа). Природный газ, охлаждаясь на выходных вентиляторах каждой секции, перемешивается и поступает в общий выходной коллектор, где температура измеряется с помощью температурных датчиков, установленных по выходу из каждой секции и на входном (выходном) коллекторе (рисунок 3.8). Использование последовательности запуска ближайших вентиляторов к выходу каждой секции приводит к увеличению пути прохождения теплого газа через секцию АВО газа, что предотвращает образования гидратных пробок в теплообменных трубках. Отключение вентилятора в каждой секции производится в обратной последовательности.

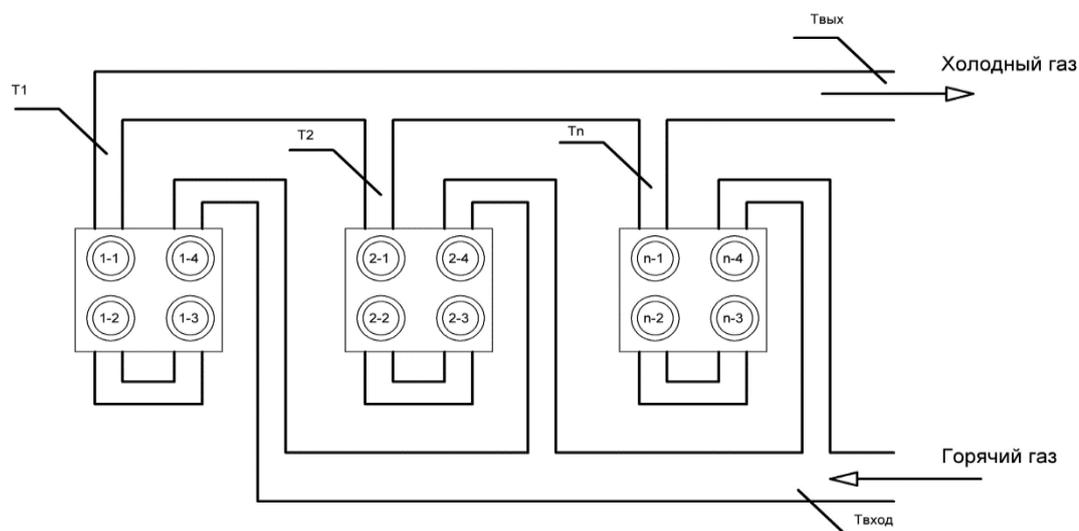


Рисунок 3.8 – Компоновка вентиляторов в АВО газа типа 2АВГ-75С:  
 $n$ -ная секция АВО газа;  $T_n$  - температурный датчик на выходе из  $n$ -ной секции;  $T_{\text{вых}}$  - температурный датчик на выходе из коллектора;  
 $T_{\text{вход}}$  - температурный датчик на входе в коллектор

### 3.2.3. Автоматический групповой запуск

Разработка алгоритма для блока АГЗ электродвигателей осуществлялась с помощью поиска решений на модели ЭТК АВО газа, разработанной во 2 главе диссертации с прямой системой пуска. На модели произведено экспериментальное исследование закономерности влияния одиночных (групповых) прямых запусков на перегрузочную способность источника питания. Пуски осуществлялись поочередно (по одному, по два и т.д.) с различным временным шагом включения АД в работу. Перегрузочная способность централизованного источника питания оценивалась с помощью пересечения аппроксимирующей кривой для пусковых токов АД с номинальным током вторичной обмотки трансформатора (рисунок 3.9).

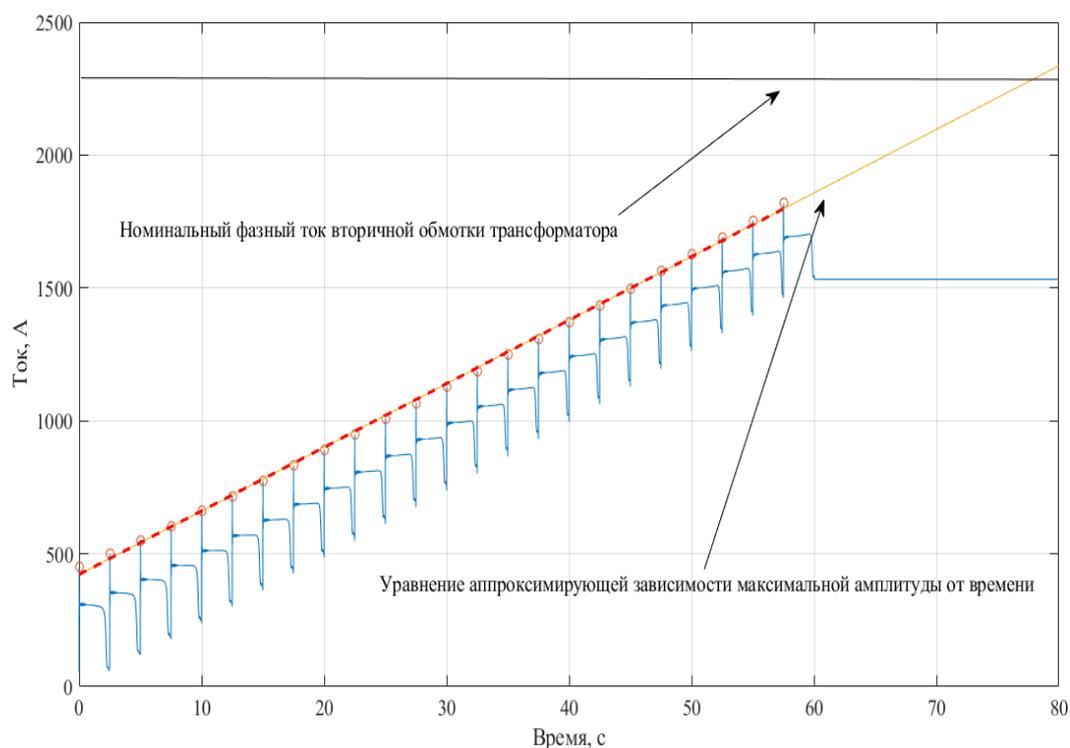


Рисунок 3.9 – Поочередная последовательность включения группы вентиляторов АВО газа (24 ед.) без перегрузки источника питания

Алгоритм включения для ЭТК АВО при прямых пусках АД, обеспечивающий восстановление технологического режима в течение наименьшего промежутка времени после появления напряжения для централизованной СЭС, может быть определён по уравнениям аппроксимирующей зависимости значений пусковых токов АД относительно линии тренда суммарного потребляемого тока группы АВО газа от времени последовательного прямого пуска (таблица 3.2).

Таблица 3.2 – Экспериментальные данные одиночных (групповых) пусков вентиляторов для ЭТК АВО газа при восстановлении питания (прямой пуск)

№	Шаг включения, с	Общее время запуска, с	Максимальная амплитуда, А	Количество одновременных запусков АД	Наличие перегрузки	Время перегрузки, мкс	Уравнение аппроксимирующей зависимости	
	$\Delta t$	$T_{общ}$	$A_{max}$					$n$
1	2,5	60,4	1818	1	нет	-	$y = 23.9235 * x + 422.0782$	
2	1	25,85	2176				$y = 61.1324 * x + 794.6353$	
3	0,95	24,5	2178				$y = 64.1797 * x + 798.0857$	
4	0,8	21,25	2310				$y = 82.9924 * x + 783.4979$	
5	0,79	21	2339		да	4	$y = 86.5507 * x + 785.5680$	
6	0,78	20,6	2355				$y = 88.9025 * x + 802.6141$	
7	0,75	20	2375				$y = 90.0683 * x + 887.0502$	
8	0,7	19	2380				6	$y = 93.7730 * x + 935.4388$
9	0,65	17,8	2390					$y = 101.4611 * x + 939.801$
10	4	47	2090				2	нет
11	3,8	44,8	2095	$y = 28.7428 * x + 868.5823$				
12	3,5	41,5	2097	$y = 31.2148 * x + 868.3088$				
13	3,1	37	2098	$y = 35.2447 * x + 868.2993$				

№	Шаг включения, с	Общее время запуска, с	Максимальная амплитуда, А	Количество одновременных запусков АД	Наличие перегрузки	Время перегрузки, мкс	Уравнение аппроксимирующей зависимости
	$\Delta t$	$T_{общ}$	$A_{max}$	$n$	да/нет	$t$	
14	2,5	30,4	2120				$y = 44.9996 \cdot x + 862.3832$
15	2,4	29,4	2220				$y = 48.9299 \cdot x + 865.4385$
16	2,32	28,7	2310				$y = 56.4942 \cdot x + 840.3766$
17	2,3	28,2	2432				да
18	2,1	26	2480	$y = 57.7697 \cdot x + 1183.024$			
19	9	68	2380	3	да	3	$y = 16.6926 \cdot x + 1312.753$
20	6	45	2385				$y = 25.0414 \cdot x + 1312.516$
21	5	38	2384				$y = 30.0637 \cdot x + 1312.596$

Результаты эксперимента показали, что наименьший промежуток времени (в мкс) включения в зависимости от максимального действующего значения тока для одиночных  $A_{onm1}$  и парных запусков  $A_{onm2}$  АД находятся в следующих пределах:

$$A_{onm1} \leq 82,9924 \cdot x + 783,4979, \quad (3.2)$$

$$A_{onm2} \leq 56,4942 \cdot x + 840,3766 \quad (3.3)$$

где  $x$  – время запуска  $n$ -ного АД в группе.

Групповые пуски (по три, по четыре АД и т.д.) приводят к перегрузке источника электроэнергии. Наименьший промежуток времени запуска для групповых пусков АД серии ВАСО4-37-24 без перегрузки источника питания

составило соответственно (см. таблицу 3.2): 21,5 сек (для одиночных пусков); 28,7 сек (для пусков по два двигателя) и более 70 сек (по три двигателя).

### **3.3. Разработка алгоритмов управления**

#### **3.3.1. Прямая система пусков**

Алгоритм работы САУ АВО газа с прямой системой пуска будет описываться блок-схемой, представленной на рисунке 3.10. Принцип действия САУ АВО газа (см. рисунок 3.6) состоит в следующем. На начальном этапе в УК задается необходимое значение температуры газа на выходном коллекторе. Если на УК от датчиков температуры через КАСЦ поступает сигнал, что температура газа превысила заданное значение температуры, то УК подает команду на ПЛК, где через ГБК производится последовательный останов на свободный выбег вентилятора из реверсного режима. Время остановки не регулируется и зависит от инерции рабочего колеса и самого АД. Если температура газа превышает заданное значение температуры, то ПЛК посредством БК производит последовательное отключение ЭП жалюзи. Если после выполнения отключений жалюзи температура газа превышает заданное значение температуры, то ПЛК посредством ГБК производит запуск вентилятора, после его остановки из реверсного режима или подключает вентилятор, находившийся в состоянии покоя. Последовательный запуск вентилятора осуществляется с необходимой выдержкой времени (см. главу 3.2.3 и подглаву 2.1.2.1) для предотвращения перегрузки источника питания. Для защиты от гидратообразования (зимний режим) порядок включения вентилятора описан в подглаве 3.2.2, для летнего режима порядок включения произвольный. Если после включения всех вентиляторов температура газа превышает заданное значение температуры,

то УК подает команду в виде предупреждения на пульт управления или в автоматическом режиме последовательно запускает ТДА (летний режим).

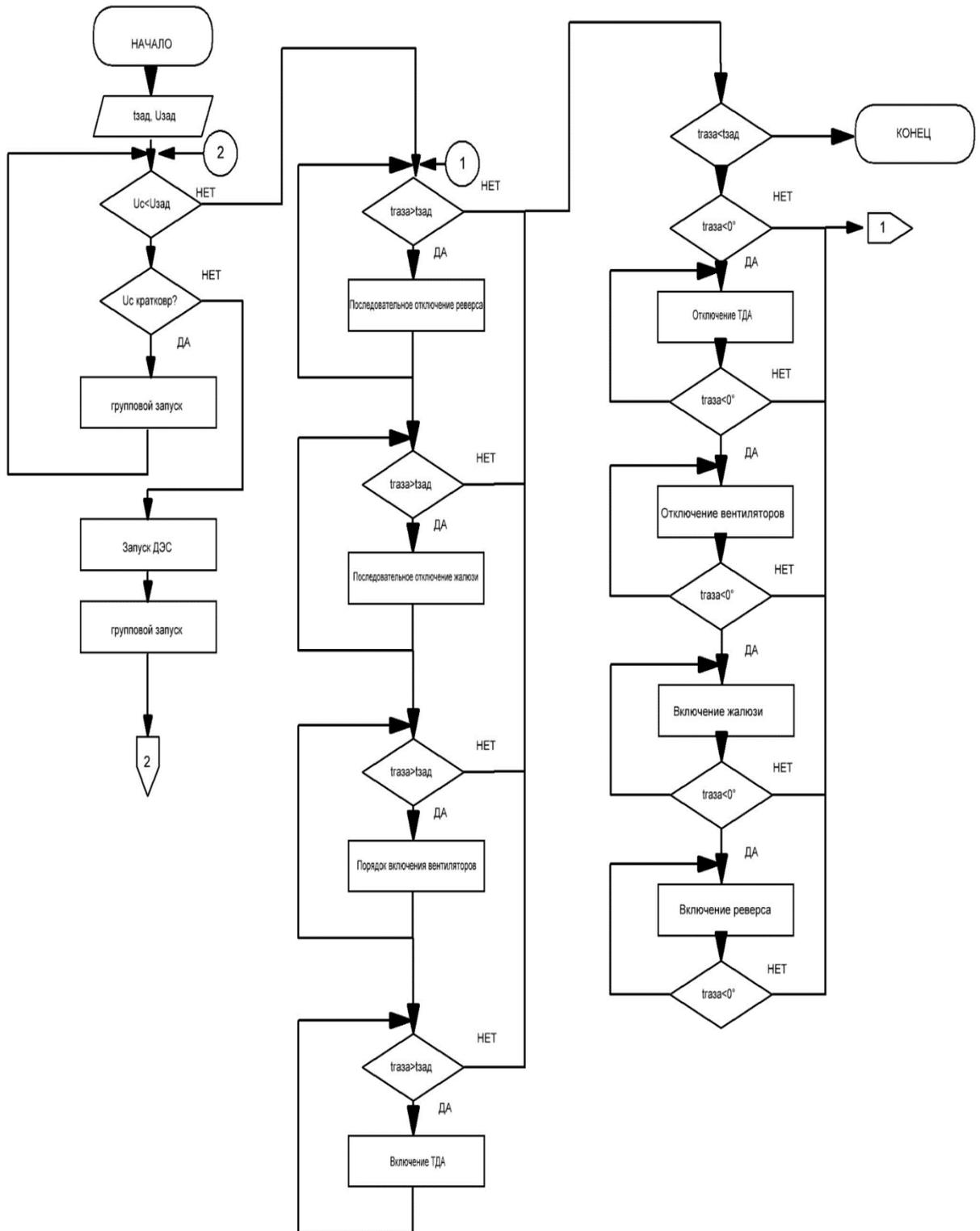


Рисунок 3.10– Алгоритм работы САУ АВО газа для прямой системы пуска

Если на УК от датчиков температуры через КАСЦ поступает сигнал, что температура теплообменных трубок в секции не достигла требуемого значения или приближается к температуре гидратообразования, то УК подает команду на ПЛК посредством ГБК о последовательном отключении вентиляторов (порядок для зимнего режима обратный, порядок для летнего режима произвольный). Если температура теплообменных трубок в секции не достигла требуемого значения и близка к температуре гидратообразования, то ПЛК через БК включает ЭП жалюзи (опционально возможно регулировать угол поворота жалюзи). Если температура теплообменных трубок в секции не достигла требуемого значения, то ПЛК через ГБК включает последовательный реверс вентилятора, который позволяет отогреть нижние ряды потоком теплого воздуха от верхних рядов теплообменных трубок.

Информация с датчиков напряжения поступает через КАСЦ на УК, при этом если происходит кратковременное исчезновение напряжения, то УК с помощью ПЛК посредством ГБК осуществляет автоматический групповой пуск вентилятора из предыдущего состояния без перегрузки централизованной СЭС (см. подглаву 3.2.3). Если происходит несколько кратковременных исчезновений напряжения (число задается в УК) или напряжение полностью исчезает, то УК подает команду в виде предупреждения на пульт управления или в автоматическом режиме запускает резервный источник питания (ДЭС), после чего осуществляется автоматический групповой пуск без перегрузки автономной СЭС. Обратный переход на централизованную СЭС осуществляется в ручном режиме.

На рисунке 3.11 приведена функциональная силовая схема АВО газа в составе трехуровневой системы САУ с прямой системой пуска.

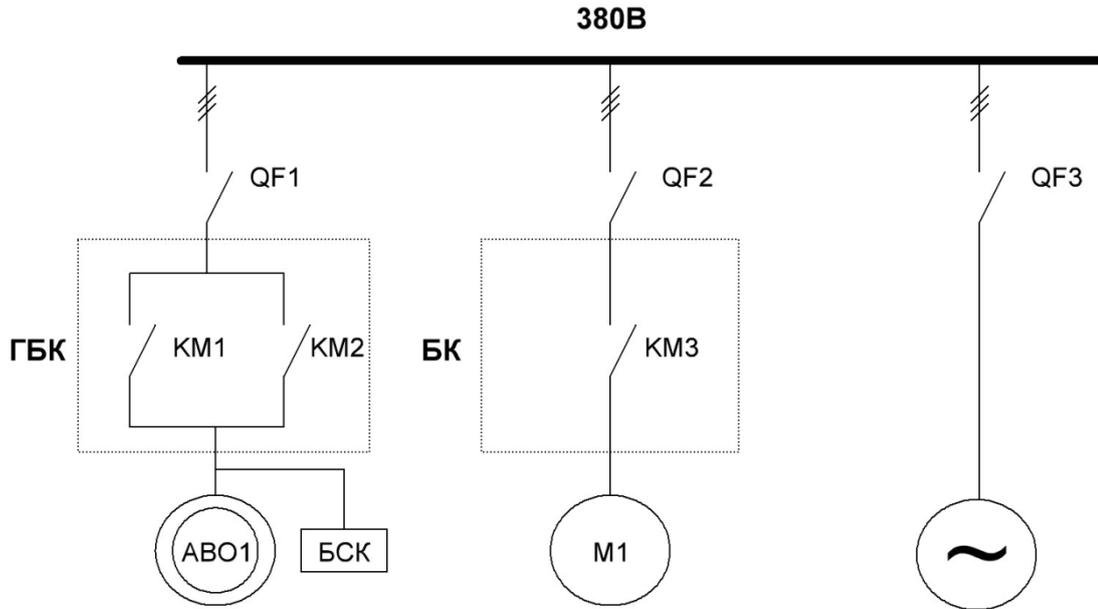


Рисунок 3.11 – Функциональная силовая схема АВО газа в составе САУ с прямой системой пуска: QF1-QF2 – автоматические выключатели; QF3 – автоматический выключатель генератора; БСК – батарея статических конденсаторов; M1– электропривод жалюзи.

### 3.3.2. Система «один ПЧ – один вентилятор»

Алгоритм работы САУ АВО газа для системы «один ПЧ – один вентилятор» будет описываться блок-схемой, представленной на рисунке 3.12. Основные отличия принципа действия САУ АВО газа от прямой системы пуска состоят в следующем. Последовательный останов вентиляторов из реверсного режима осуществляется за счет торможения с помощью ПЧ (генераторное, динамическое, комбинированное, экстренное торможение). Торможение ПЧ позволяет осуществить контроль и сократить время торможения в отличие от торможения свободным выбегом. Если температура газа превышает заданное значение температуры, то ПЛК подключает вентилятор к электрической сети посредством ГБК через ПЧ. ПЧ производит плавный запуск вентилятора до необходимой частоты из



Если на УК от датчиков температуры через КАСЦ поступает сигнал, что температура теплообменных трубок в секции приближается к температуре гидратообразования, то УК подает команду на ПЛК о постепенном снижении частоты вращения вентилятора, после чего происходит контролируемое торможение с помощью ПЧ с последующим отключением вентилятора от сети посредством ГБК. Если температура теплообменных трубок в секции не достигла требуемого значения и близка к температуре гидратообразования, то ПЛК подключает вентилятор к электрической сети посредством ГБК через ПЧ, которое осуществляет реверс, с постепенным увеличением частоты вращения, позволяющим отогреть нижние ряды потоком теплого воздуха от верхних рядов теплообменных трубок.

На рисунке 3.13 приведена функциональная силовая схема АВО для системы «один ПЧ – один вентилятор» в составе трехуровневой системы САУ.

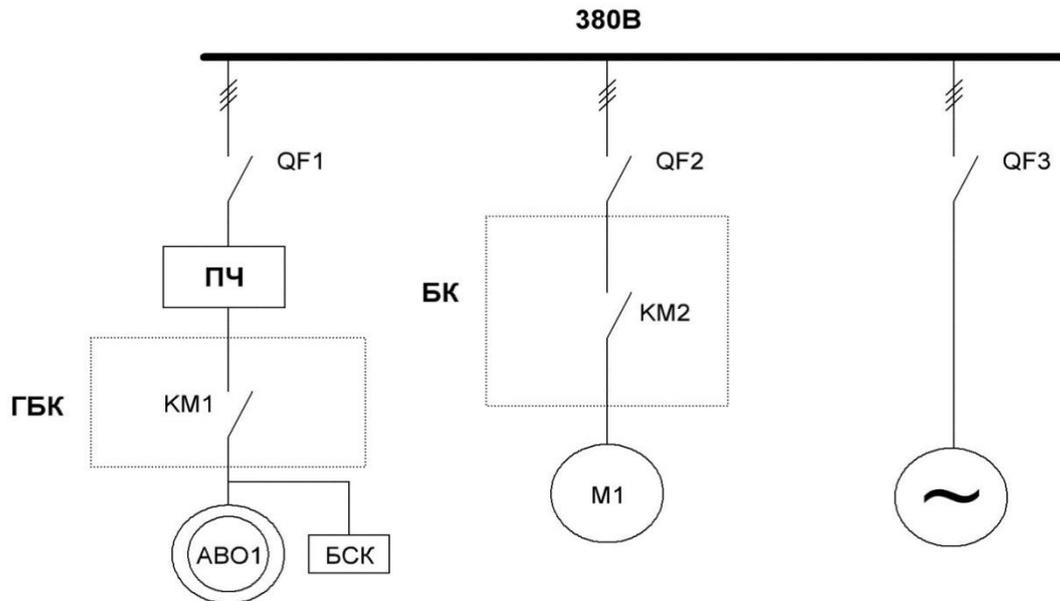


Рисунок 3.13 – Функциональная силовая схема АВО газа для системы «один ПЧ – один вентилятор» в составе трехуровневой системы САУ



Основные отличия принципа действия от схемы АВО газа от системы «один ПЧ – один вентилятор» состоят в следующем. После разгона АД до номинальной частоты, ПЛК посредством ГБК отключает ПЧ от вентилятора и подключает вентилятор к трехфазной сети напрямую. Если температура газа после разгона вентилятора до номинальной частоты не достигла требуемого значения, то ПЛК подключает ПЧ к следующему вентилятору.

При приближении к температуре гидратообразования УК подает команду на ПЛК, который с помощью ГБК отключает вентилятор от сети и подключает его к ПЧ, который начинает снижать скорость вентилятора. Если условия по температуре не были достигнуты, то производится контролируемое торможение до полной остановки с последующим реверсом.

На рисунке 3.15 приведена функциональная силовая схема АВО для системы «один ПЧ – группа вентиляторов» в составе трехуровневой системы САУ.

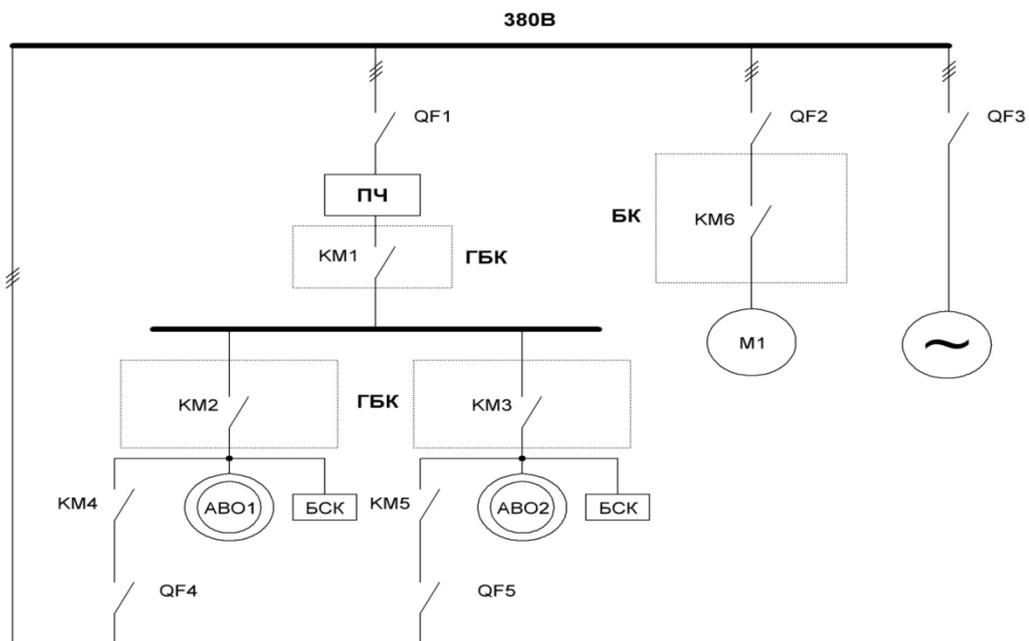


Рисунок 3.15 – Функциональная силовая схема АВО газа для системы «один ПЧ – группа вентиляторов» в составе трехуровневой системы САУ

### 3.3.4. Система «один СПП – один вентилятор»

Алгоритм работы САУ АВО газа для системы «один СПП – один вентилятор» будет описываться блок-схемой, представленной на рисунке 3.16.

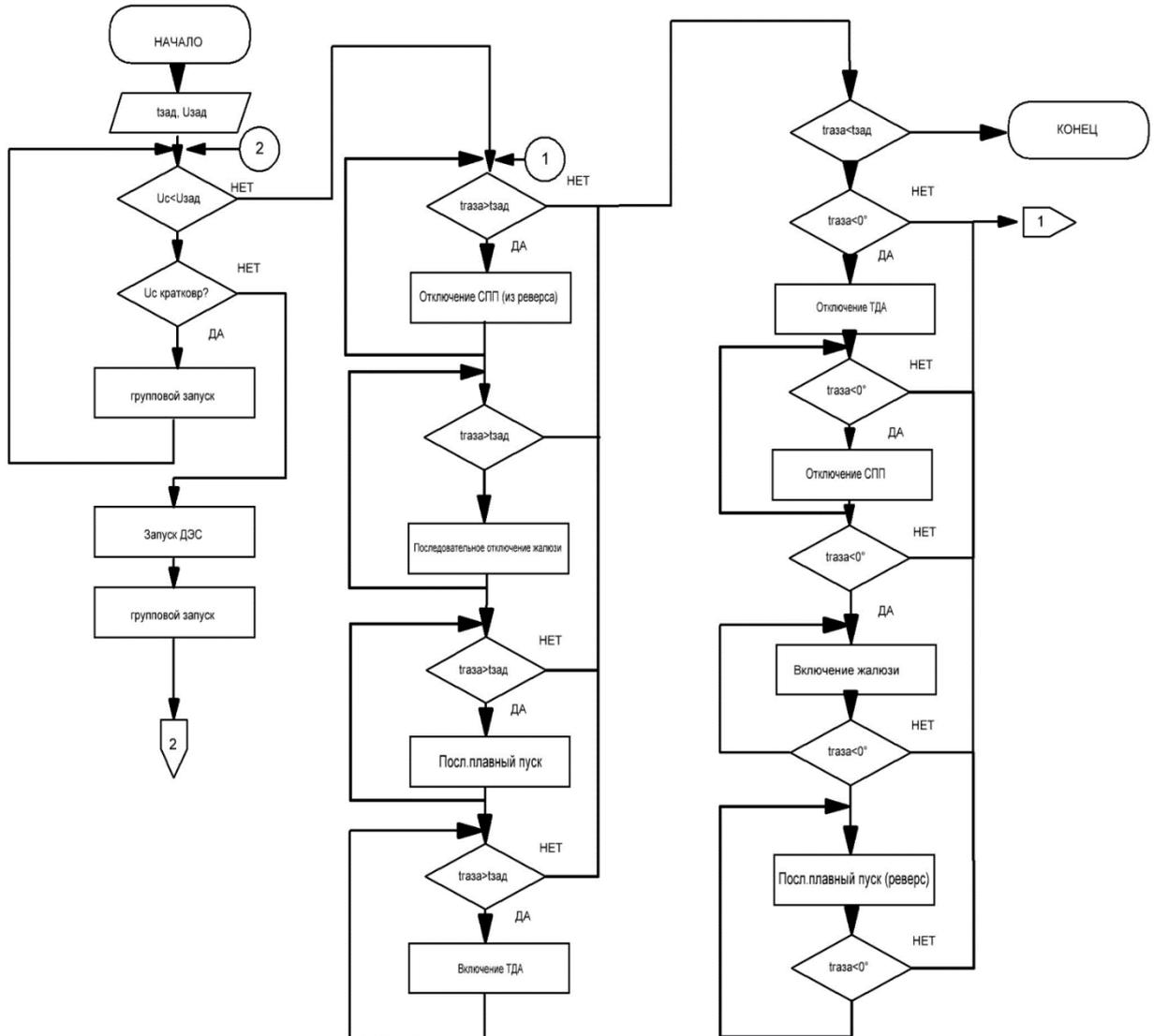


Рисунок 3.16 – Алгоритм работы САУ АВО газа («один СПП – один вентилятор»)

Основные отличия принципа действия САУ АВО газа от прямой системы пуска состоят в следующем. Если температура газа превышает

заданное значение температуры, то ПЛК подключает вентилятор к электрической сети посредством ГБК через СПП. СПП производит плавный запуск вентилятора из состояния покоя или после его остановки из реверсного режима. Если температура газа после разгона вентилятора до номинальной частоты не достигла требуемого значения, то ПЛК подключает следующую пару (вентилятор – СПП).

Если на УК от датчиков температуры через КАСЦ поступает сигнал, что температура теплообменных трубок в секции приближается к критичной температуре гидратообразования, то УК подает команду на ПЛК о последовательном отключении вентилятора от СПП посредством ГБК. Если температура теплообменных трубок в секции не достигла требуемого значения и близка к критичной температуре гидратообразования, то ПЛК подключает вентилятор к электрической сети посредством ГБК через СПП, которое осуществляет реверс из состояния покоя.

На рисунке 3.17 приведена функциональная силовая схема АВО для системы «один СПП – один вентилятор» в составе трехуровневой системы САУ.

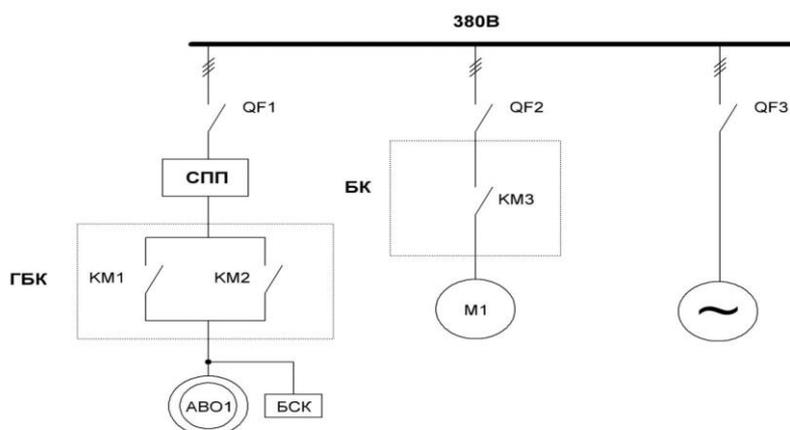


Рисунок 3.17 – Функциональная силовая схема АВО газа для системы «один СПП – один вентилятор» в составе трехуровневой системы САУ



Основные отличия принципа действия САУ АВО газа от системы «один СПП – один вентилятор» состоят в следующем. Если температура газа превышает заданное значение температуры, то ПЛК подключает вентилятор к электрической сети посредством ГБК через СПП. СПП производит плавный запуск вентилятора из состояния покоя или после его остановки из реверсного режима. После разгона вентилятора до номинальной частоты, ПЛК посредством ГБК отключает СПП от вентилятора и подключает вентилятор к трехфазной сети напрямую. Если температура газа после разгона вентилятора до номинальной частоты не достигла требуемого значения, то ПЛК подключает СПП к следующему вентилятору. Число последовательных включений (отключений) для одного СПП ограничено, по причине вероятного перегрева устройства и привода [89].

На рисунке 3.19 приведена функциональная силовая схема АВО для системы «один СПП – группа вентиляторов» в составе трехуровневой системы САУ.

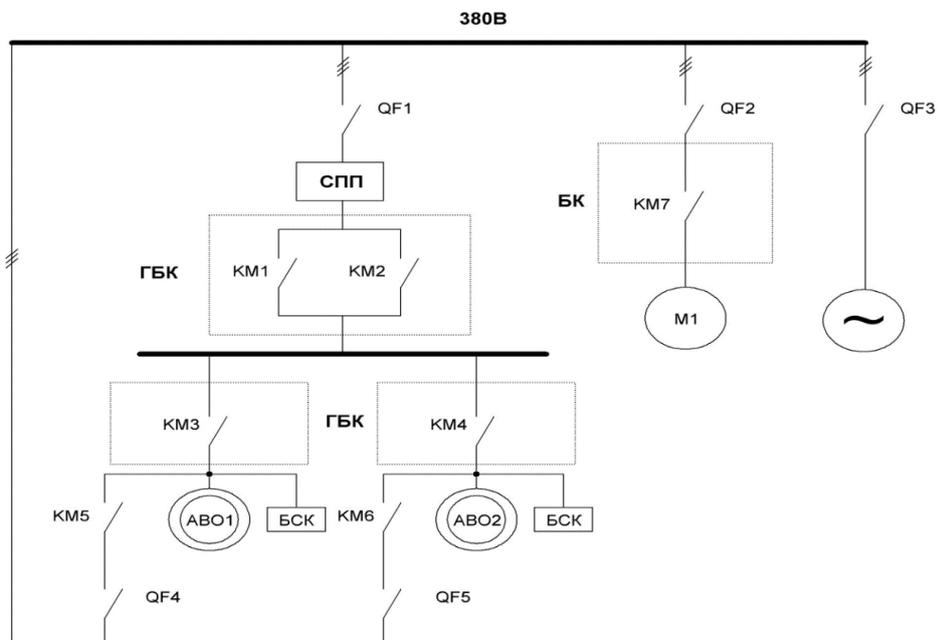


Рисунок 3.19 – Функциональная силовая схема АВО газа для системы «один СПП – группа вентиляторов» в составе трехуровневой системы САУ

### Выводы по третьей главе

1. Произведен патентный обзор и проанализированы программно-технические решения САУ АВО газа на российском рынке, который показал, что существует ряд вопросов совершенствования САУ АВО газа с учетом требований к качеству управления и специфических особенностей объекта.

2. Разработана структурная схема трехуровневого комплекса САУ АВО газа. Предложена трехступенчатая защита от гидратообразования в теплообменных трубках АВО газа, которая включает в себя строгий порядок запуска каждого вентилятора, жалюзи и реверса вентиляторов в секции АВО газа типа 2АВГ-75С, включенная в алгоритм САУ.

3. Разработан алгоритм для блока автоматического группового пуска вентиляторов АВО газа. Произведено исследование закономерности влияния одиночных (групповых) прямых запусков на перегрузочную способность источника электроэнергии на компьютерной модели в программном комплексе MATLAB/Simulink с помощью которого был определен наименьший промежуток времени запуска группы вентиляторов.

4. Разработаны алгоритмы для систем пуска и функциональные силовые схемы работы вентиляторов АВО газа с использованием ПЧ и СПП по схемам: прямая система пуска, система «один ПЧ – один вентилятор», система «один ПЧ – группа вентиляторов», система «один СПП – один вентилятор», система «один СПП – группа вентиляторов».

5. Получен патент для САУ АВО газа, который включает в себя эффективные алгоритмы управления и защиты для различных режимов работы и видов оборудования, обеспечивает поддержание технологического режима работы ГП и его восстановление в течение наименьшего промежутка времени в аварийных режимах эксплуатации без перегрузки источника электроэнергии (патент РФ на изобретение № 2807138).

## **ГЛАВА IV. МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ПОВЫШЕНИЮ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА ГАЗОВОГО ПРОМЫСЛА №1 ООО «ГАЗПРОМ ДОБЫЧА ЯМБУРГ»**

### **4.1. Модернизация электротехнического комплекса с централизованной системой электроснабжения**

#### **4.1.1. Комбинированный метод управления**

Существующий ЭТК АВО газа имеет ряд следующих недостатков:

1) нерегулируемые электроприводы, которые создают продолжительные пусковые токи, связанные с большой инерционностью рабочего колеса и электродвигателя, а учитывая особенности АД серии ВАСО, которые имеют значительный пусковой ток, возникают проблемы, связанные с перегрузками источника электропитания при запуске местным оперативным персоналом в ручном режиме;

2) при протекании продолжительного пускового тока по обмоткам АД происходит интенсивный нагрев статорной обмотки, что приводит к потерям мощности в электродвигателе.

Исследования последних лет показывают, что основными методами решения указанных проблем является переход с нерегулируемого привода на регулируемый от преобразователей частоты, который позволяет уменьшить потери электроэнергии электродвигателя в пусковых режимах [109]. Анализ работы [84] показал, что наиболее предпочтительным с экономической точки зрения является использование комбинированного метода управления, которое заключается в совмещении устройства плавного пуска и ПЧ. Использование комбинированного метода целесообразно при оборудовании АВО с ПЧ в соотношении 1:5.

На рисунке 4.1 приведена разработанная функциональная силовая схема АВО для комбинированной системы запуска «СПП + ПЧ» в составе трехуровневой системы САУ.

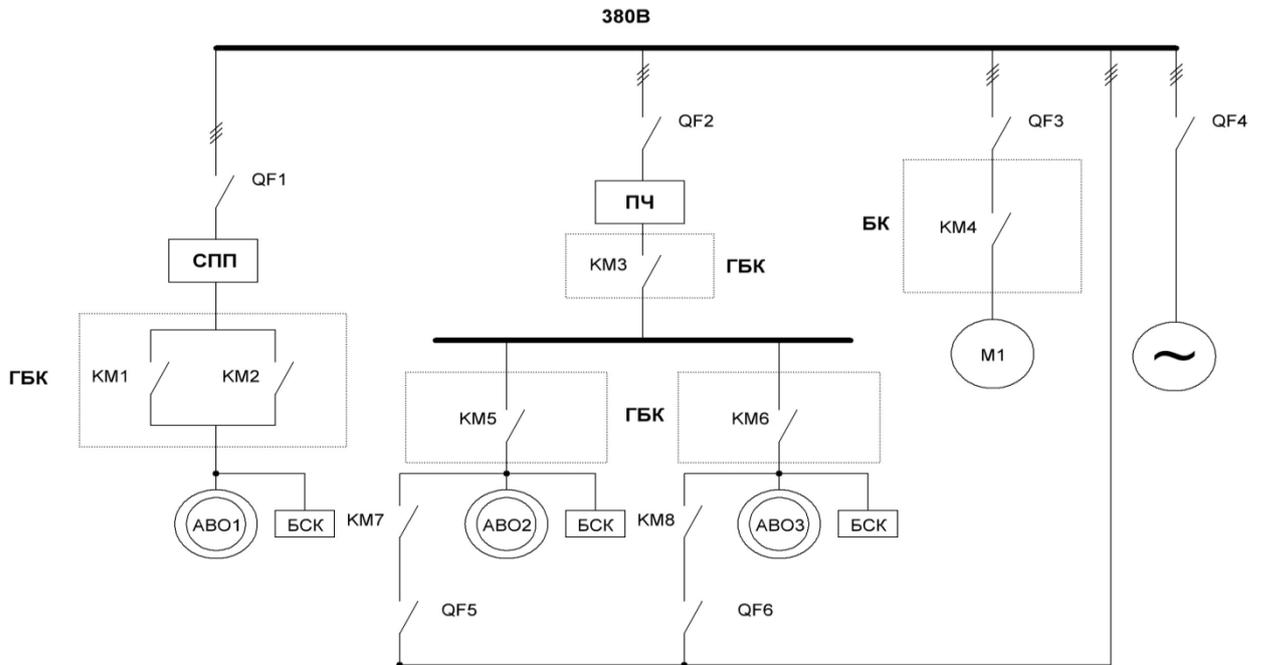


Рисунок 4.1 – Функциональная силовая схема АВО для комбинированной системы запуска «СПП + ПЧ» в составе трехуровневой системы САУ.

Алгоритм работы САУ АВО газа для комбинированной системы запуска «СПП + ПЧ» будет описываться блок-схемой, представленной на рисунке 4.2. Принцип действия САУ АВО газа (см. рисунок 3.6) состоит в следующем. На начальном этапе в УК задается необходимое значение температуры газа на выходном коллекторе. Если на УК от датчиков температуры газа через КАСЦ поступает сигнал, что температура газа превысила заданное значение температуры, то УК подает команду на ПЛК, где через ГБК производится последовательный останов вентиляторов. Если после последнего отключения вентилятора температура газа превышает заданное значение температуры, то ПЛК посредством БК производит

последовательное отключение ЭП жалюзи. Если после отключения последнего жалюзи температура газа превышает заданное значение температуры, то ПЛК посредством ГБК подключает СПП и производит плавный последовательный запуск вентиляторов, после его остановки из реверсного режима или подключает вентилятор, находившийся в отключенном состоянии.

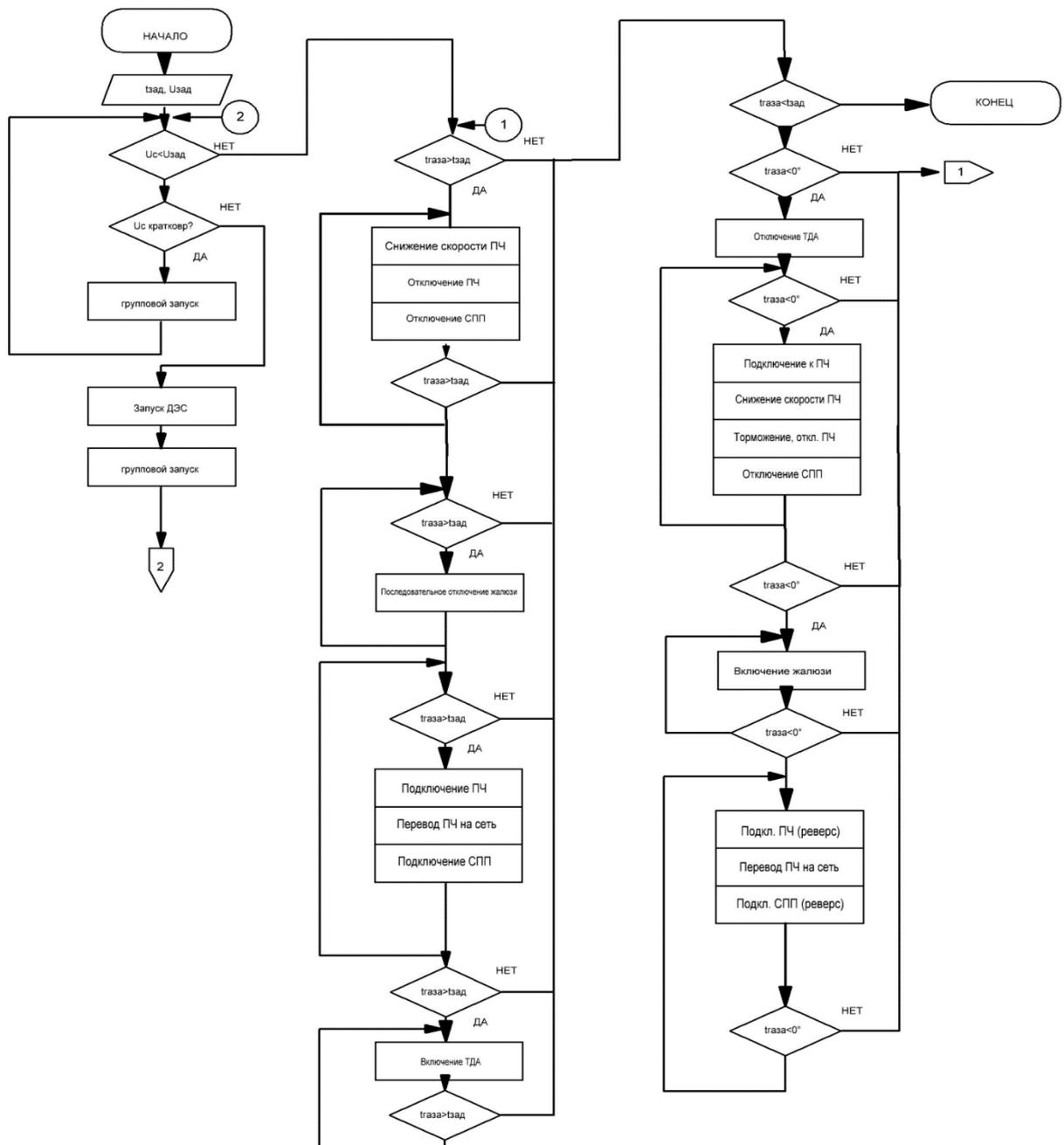


Рисунок 4.2 – Алгоритм работы САУ АВО газа («ПЧ + СПП»)

Если после подключения последнего СПП температура газа превышает заданное значение температуры, то ПЛК подключает вентилятор к электрической сети посредством ГБК через ПЧ. ПЧ производит плавный запуск вентилятора из состояния покоя, после его остановки из реверсного режима или осуществляет подхват «на ходу». После разгона АД до номинальной частоты, ПЛК посредством ГБК отключает ПЧ от вентилятора и подключает вентилятор к трехфазной сети напрямую. Если температура газа после разгона вентилятора до номинальной частоты не достигла требуемого значения, то ПЛК подключает ПЧ к следующему вентилятору. Если температура газа превышает заданное значение температуры, то УК подает команду в виде предупреждения на пульт управления или в автоматическом режиме последовательно запускает ТДА (летний режим).

Если на УК от датчиков температуры через КАСЦ поступает сигнал, что температура теплообменных трубок в секции приближается к температуре гидратообразования, то УК подает команду на ПЛК, который с помощью ГБК отключает вентилятор от сети и подключает его к ПЧ, который начинает снижать скорость вентилятора. Если температура теплообменных трубок в секции не достигла требуемого значения и близка к температуре гидратообразования, то ПЛК посредством ПЧ производит контролируемое торможение до полной остановки с последующим реверсом или останавливает СПП через ГБК с последующим реверсом.

Информация с датчиков напряжения поступает через КАСЦ на УК, при этом если происходит кратковременное исчезновение напряжения, то УК с помощью ПЛК посредством ГБК осуществляет автоматический групповой пуск вентилятора с помощью СПП и ПЧ из предыдущего состояния. Если происходит несколько кратковременных исчезновений напряжения (число задается в УК) или напряжение полностью исчезает, то УК подает команду в виде предупреждения на пульт управления или в автоматическом режиме запускает ДЭС-1, где осуществляется контроль нагрузки (см. подглаву 4.1.1). Если нагрузка приближается к максимальному пороговому значению, то

включается ДЭС-2 и входит в параллельную работу с ДЭС-1. Если нагрузка приближается к минимальному пороговому значению, то после необходимой выдержки времени отключается ДЭС-2. Обратный переход на централизованную СЭС осуществляется в ручном режиме.

С помощью компьютерной модели были определены потери мощности при прямом пуске, с использованием ПЧ, системы плавного пуска для АД серии ВАСО4-37-24 со стеклопластиковым рабочим колесом типа ГАЦ-50-4М2 из состояния покоя (таблица 4.1).

Таблица 4.1 – Таблица результатов моделирования пусков АВО газа с АД серии ВАСО4-37-24

Способ пуска	Время пуска, с	Потери мощности, Вт	Потери мощности, %
Прямая система	2,86	2495,22	6,74
Преобразователь частоты	7,46	578,21	1,56
Система плавного пуска	5,67	593,45	1,6

Внедрение комбинированного метода управления позволит получить надежную в работе схему каскадно-группового управления АВО газа и обеспечить высокое качество регулирования температуры охлаждаемой среды в широком диапазоне изменений климатических условий. Внедрение комбинированного метода управления позволяет получить экономическое преимущество до 55% в стоимостном эквиваленте по сравнению с традиционными системами регулирования с использованием ПЧ и СПП [84]. Результаты на компьютерной модели показали, что использование ПЧ и СПП дает снижение потерь мощности при пусках по сравнению с прямой системой пуска в диапазоне до 77%.

#### 4.1.2. Электротехнический комплекс теплоснабжения газового промысла

Разработанная структурная динамическая схема ЭТК ГП с централизованной СЭС (рисунок 1.2) показала, что ЭТК содержит в своем составе несколько ЭТК, отличающихся друг от друга отдельными элементами, энергетическими характеристиками и назначением. Исследование структуры ЭТК выявило большое потребление электроэнергии, которое осуществляется для транспортировки воды в системе теплоснабжения промысла с помощью четырех насосов типа 1Д500-63 ( $Q=500 \text{ м}^3/\text{ч}$ ,  $H=63 \text{ м}$ ) и АД серии АМН 280М-4 (таблица 4.2). Пуск насосов данной группы тяжелый и сопровождается кратковременным исчезновением напряжения.

Таблица 4.2 – Каталожные данные АД серии АМН 280М-4

Наименование параметра	Значение
Номинальная мощность, $P_n$	160 кВт
Номинальное напряжение, $U_{ном}$	380 В
Число фаз, $m$	3
Номинальный ток, А	297
Номинальная частота вращения, $n_n$	1480 об/мин
Синхронная частота вращения, $n_1$	1500 об/мин
Коэффициент мощности, $\cos\varphi$	0,87
КПД, $\eta$	94 %
Отношение пускового тока к номинальному току, $\lambda$	6,8
Отношение пускового момента к номинальному моменту, $k_p$	1,8
Отношение макс. момента к номинальному моменту, $k_m$	2

Для оценки энергетических параметров и получения электромеханических характеристик для электротехнического комплекса

была разработана модель в компьютерной программе MATLAB/Simulink по каталожным (паспортным) данным его отдельных элементов, по методикам, описанным в третьей главе диссертационного исследования. Результаты расчета параметров схемы замещения для АД приведены в таблице 4.3.

Таблица 4.3 – Результаты расчета параметров схемы замещения по каталожным данным АД серии АМН 280М-4

Наименование расчетной величины	Параметр	Значение
Активное сопротивление обмотки статора, Ом	$R_s$	0,01639
Активное сопротивление обмотки ротора, Ом	$R_r$	0,009893
Индуктивность обмотки статора, Гн	$L_s$	0,000327
Индуктивность обмотки ротора, Гн	$L_r$	0,000338
Индуктивность ветви намагничивания, Гн	$L_m$	0,005436

Момент сопротивления насоса [108] будет определяться как:

$$M_c = 9,565 \cdot \frac{\rho \cdot g \cdot Q \cdot H}{\eta \cdot n}, \quad (4.1)$$

где  $\rho$  – плотность жидкости, кг/м<sup>3</sup>;  $Q$  – расход жидкости, м<sup>3</sup>/с;  $H$  – напор жидкости, м;  $\eta$  – КПД насоса,  $n$  – частота вращения АД, об/мин.

По технологическому циклу в работе должны находиться два насоса, произведем имитацию восстановления питания при аварийном режиме, когда с помощью самоподхвата одновременно запускаются два АД. Результаты одновременного пуска (рисунок 4.3) показали, что ЭТК имеет ограничение по перегрузочной способности с автономной системой электроснабжения. Одновременный запуск АД для ЭТК повлечет за собой аварийный останов ДЭС с дальнейшим технологическим срывом производственного процесса на период восстановления электроснабжения. Вариантами решения задачи

являются: 1) замена на ДЭС большей мощности при реконструкции и модернизации электрооборудования; 2) создание единого центра генерации электрической энергии с каскадной (кольцевой) схемой включения; 3) запуск с помощью ПЧ или СПП; 4) запуск насосов с выдержкой времени с помощью средств релейной автоматики.

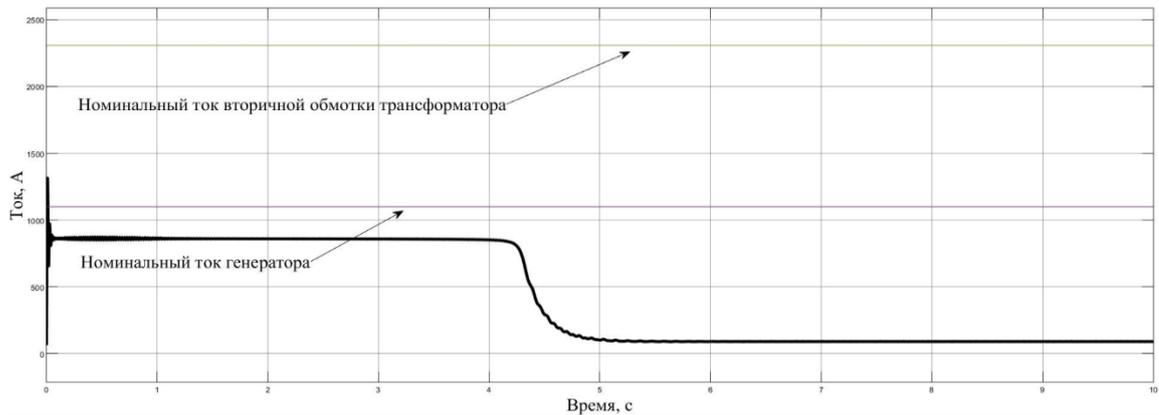


Рисунок 4.3 – Результаты проверки на перегрузочную способность при одновременном запуске насосов

Решение на компьютерной модели (рисунок 4.4) показало, что необходимую перегрузочную способность для ДЭС обеспечивает выдержка времени в диапазоне 5-6 секунд с прямым пуском.

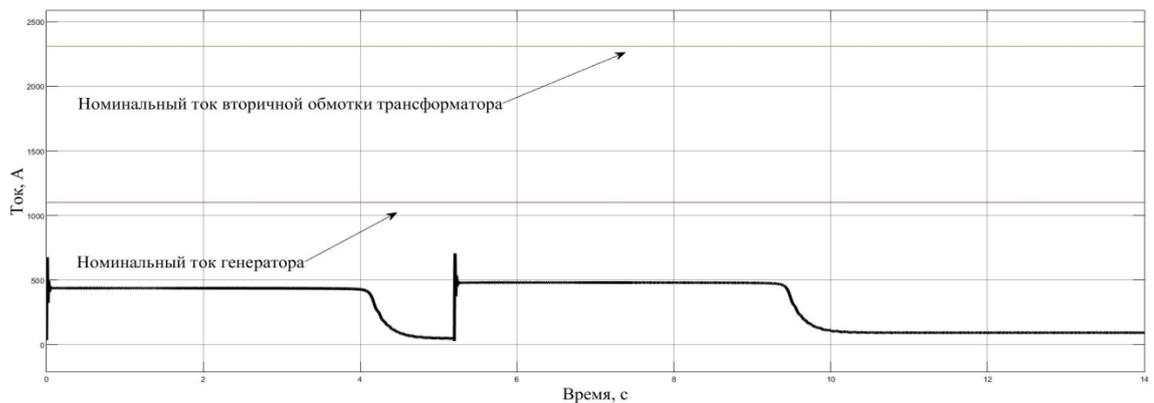


Рисунок 4.4 – Результаты проверки ЭТК на перегрузочную способность при запуске насосов с выдержкой времени

## 4.2. Модернизация электротехнического комплекса с автономной системой электроснабжения

### 4.2.1. Единый комплекс генерации электрической энергии

Исследования, проведенные для автономной СЭС газового промысла в первой главе диссертации, выявили следующие особенности функционирования:

1) ДЭС работают отдельно и независимо друг от друга на электрические нагрузки с большими пусковыми токами (приточная вентиляция, воздушные холодильники, ММД АВО газа, стартера ГПА, насосы технологических жидкостей, мощные сетевые насосы воды);

2) расчетные данные для автономной СЭС показали превышение пикового тока над максимальной силой тока генерации ДЭС на 15-20 %;

3) средневзвешенные коэффициенты загрузки лежат ниже 0,75 (ДЭС-1 – 0,51; ДЭС-2 – 0,38; ДЭС-3 – 0,39), что говорит об избыточной установленной мощности ДЭС, и, как следствие, о ненормированном перерасходе дизельного топлива на единицу добычи и подготовки газа;

Анализ работ [90-97] показывает, что снижение в автономных системах электроснабжения удельных затрат топлива на единицу добываемой продукции является важной научно-технической задачей. Анализ литературных источников показывает, что методы снижения удельных затрат топлива на единицу добываемой продукции в автономных системах электроснабжения ГП проработаны недостаточно. Одним из предлагаемых автором решением проблем (1-3) является объединение ДЭС в единый центр генерации с каскадной (кольцевой) схемой включения.

Уменьшение удельного расхода дизельного топлива можно достичь с помощью объединения нескольких ДЭС в единый центр генерации с каскадной (кольцевой) схемой включения (рисунок 4.5). Обозначим предлагаемый электротехнический комплекс как ЭТК-2, а существующий

как ЭТК-1. Каскадная схема включения позволит включать (отключать) ДЭС согласно граничным значениям потребляемой мощности, что позволит увеличить коэффициент загрузки и продлить ресурс дизельных двигателей [98].

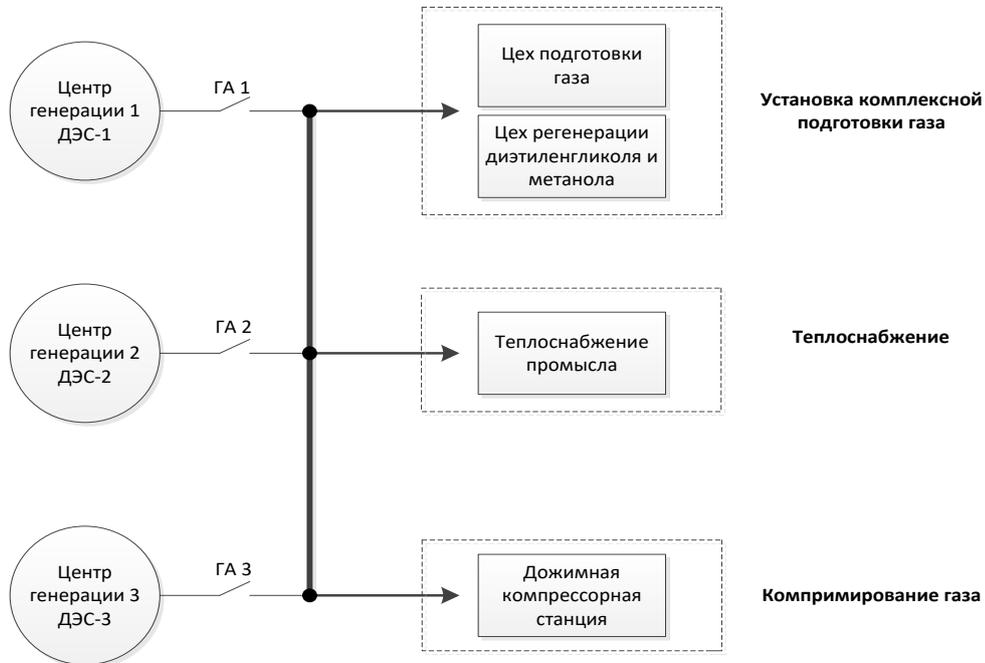


Рисунок 4.5 – Структурная схема каскадного включения ДЭС:

ГА – генераторный автомат.

Определим граничные значения потребляемой мощности, при достижении которых подключается либо отключается очередной дизель-генератор:

1) определяется оптимальная мощность ДЭС при коэффициенте загрузки равной 0,75 (примем номинальные мощности ДЭС-1 и ДЭС-2 (ДЭС-3) равными):

$$P_{опт} = P_{ном} \cdot 0,75 = 630 \cdot 0,75 = 472,5 \text{ кВт} \quad (4.2)$$

где  $P_{ном}$  – номинальная мощность ДЭС;

2) из показаний ежемесячного потребления электроэнергии КТП за 2019 год (таблица 1.14) определяется суммарная потребляемая мощность КТП №1, №3, №4 за каждый месяц –  $\sum P_{кмп}$  ;

3) определяется количество ДЭС, которые смогут обеспечить требуемую потребность мощности:

$$x \cdot P_{онт} \geq \sum P_{кмп}, \quad (4.3)$$

где  $x$  – количество ДЭС с каскадной схемой включения;

4) определяется потребляемая мощность каждой ДЭС с каскадной схемой включения –  $P_{потр}$

$$P_{потр} = \frac{\sum P_{кмп}}{x} \quad (4.4)$$

5) Полученные значения из (4.2-4.4) вносятся в таблицу 4.4.

Таблица 4.4 – Ежемесячные показатели потребления мощности КТП и ДЭС при каскадной схеме включения

Месяц	$\sum P_{кмп}$ , кВт·ч	$P_{потр}$ , кВт·ч	$x$
январь	947	315,67	3
февраль	888	444	2
март	962	320,67	3
апрель	859	429,5	2
Май	865	432,5	2
июнь	603	301,5	2
июль	572	286	2
август	615	307,5	2
сентябрь	774	387	2
октябрь	854	427	2
ноябрь	915	457,5	2
декабрь	1008	336	3

В соответствии с потребленной мощностью каждой ДЭС с каскадной схемой включения (ЭТК-2) (таблица 4.4) рассчитаем и сравним ежемесячный коэффициент загрузки и средневзвешенный коэффициент загрузки ( $K_{год.срдвзв.}$ ) ЭТК-2 с ЭТК-1 (существующая схема см. рисунок 1.13) (таблица 4.5).

Таблица 4.5 – Показания ежемесячного и годового средневзвешенного коэффициента загрузки

№ ДЭС	№ ЭТК	январь	февраль	март	апрель	май	июнь	июль	август	сентябрь	октябрь	ноябрь	декабрь	$K_{год.срдвзв.}$
1	1	0,53	0,5	0,6	0,52	0,56	0,34	0,49	0,52	0,5	0,52	0,51	0,55	0,51
	2	0,5	0,7	0,51	0,68	0,69	0,48	0,45	0,49	0,61	0,68	0,73	0,53	0,59
Разница между ЭТК-2 и ЭТК-1, %														13,56
2	1	0,46	0,43	0,46	0,43	0,43	0,36	0,13	0,16	0,37	0,43	0,45	0,5	0,38
	2	0,5	0,7	0,51	0,68	0,69	0,48	0,45	0,49	0,61	0,68	0,73	0,53	0,59
Разница между ЭТК-2 и ЭТК-1, %														35,59
3	1	0,49	0,46	0,44	0,4	0,37	0,24	0,27	0,28	0,34	0,38	0,47	0,53	0,39
	2	0,5	-	0,51	-	-	-	-	-	-	-	-	0,53	0,51
Разница между ЭТК-2 и ЭТК-1, %														23,53

Зависимость удельного расхода топлива от нагрузки является нелинейной функцией, а обеспечение минимального расхода топлива ДЭС – задача нелинейной оптимизации. Воспользуемся формулой (4.5), в которой приведена универсальная зависимость удельного расхода топлива ДЭС от коэффициента загрузки [99]:

$$g = g_{ном} (0,0811 \cdot k_3^{-1,385} + 0,912), \quad (4.5)$$

где  $g_{ном}$  – удельный расход топлива при номинальной нагрузке (таблица 4.4),  $k_3$  – коэффициент загрузки ДЭС.

Построим графики зависимостей удельного расхода топлива от коэффициента загрузки для ДЭС (Cummins C900D5, БЭС – 630, КАС – 630)

(рисунок 4.6) и сравним годовые расходы топлива ЭТК-2 с ЭТК-1 (таблица 4.6) по месячным коэффициентам загрузки (из таблицы 4.4).

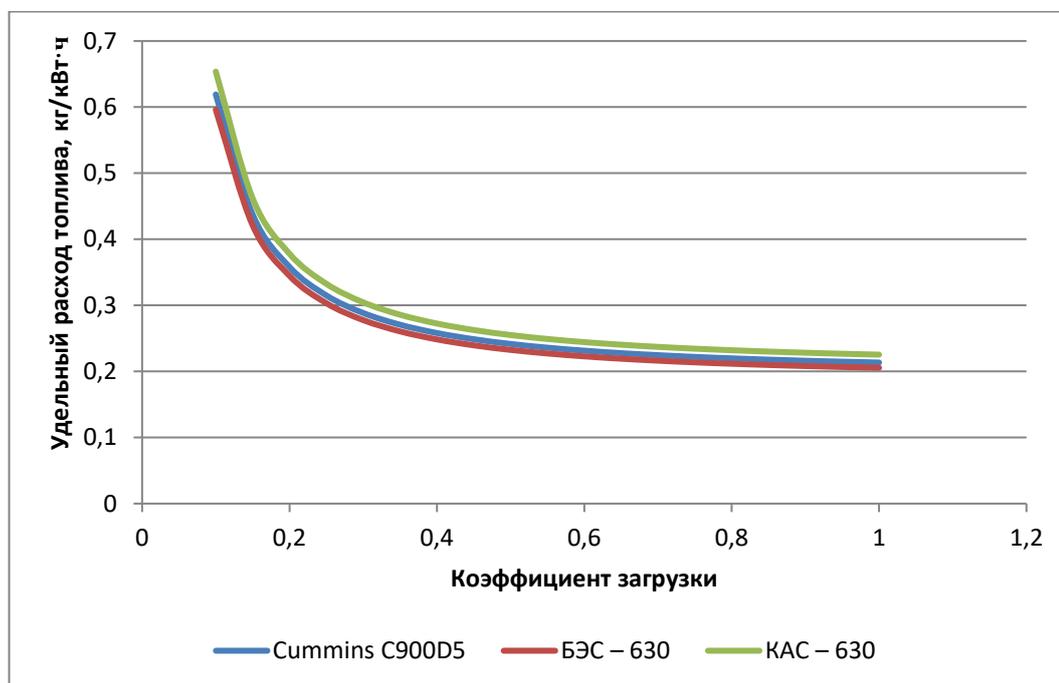


Рисунок 4.6 – График зависимости удельного расхода топлива от коэффициента загрузки для ДЭС (Cummins C900D5, БЭС – 630, КАС – 630)

Таблица 4.6 – Показания ежемесячного и годового расхода дизельного топлива для ЭТК-1 и ЭТК-2, кг

№ ЭТК	1	1	1	2	Разница расхода топлива между ЭТК-2 и ЭТК-1, %
январь	82,04	69,35	78,85	229,75	
февраль	78,44	65,63	75,67	195,55	
март	90,23	69,18	73,44	232,45	
апрель	80,42	65,8	68,13	190,29	
май	85,3	65,46	64,71	191,37	
июнь	60,62	58,52	51,2	144,67	
июль	76,65	38,92	54,24	139,29	
август	81,14	40,15	55,06	146,76	
сентябрь	78,98	59,17	61,53	174,95	
октябрь	81,14	65,46	66,86	189,38	
ноябрь	80,06	68,16	76,23	200,46	
декабрь	84,03	73,1	84,14	240,74	
всего	2508,03			2275,66	9,265

Анализ годового графика совокупного расхода дизельного топлива для существующего ЭТК с автономной системой электроснабжения от ДЭС-1, ДЭС-2, ДЭС-3, ДЭС-4 за период с 2019 по 2023 год (рисунок 4.7) показывает, что при условии модернизации на ЭТК-2 в 2021 году удалось бы снизить расход с 37,456 до 33,985 тонн дизельного топлива, где экономия составила бы 3,471 тонна (3627,38 литров) или 10,08 часов работы (13,849 тыс.кВт·ч электрической энергии).

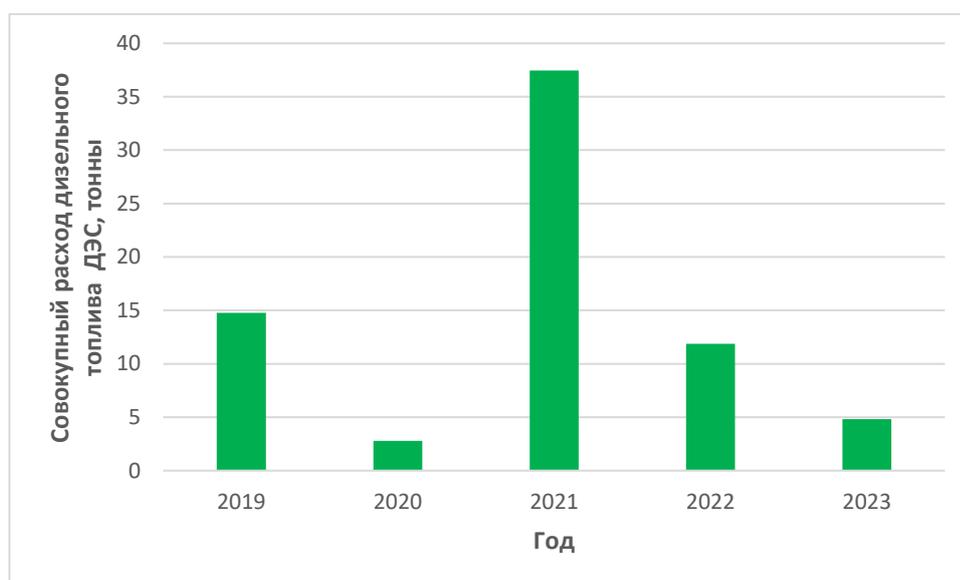


Рисунок 4.7 – Совокупный расход дизельного топлива ДЭС от ЭТК-1

Модернизация ЭТК-1 на ЭТК-2 позволит получить следующие преимущества: 1) экономический эффект за счет прогнозируемого снижения перерасхода дизельного топлива до 10%; 2) увеличение ресурса работы двигателя ДЭС за счет снижения эффекта карбонизации, возникающего при низком коэффициенте загрузки [30]; 3) повышение перегрузочной способности ДЭС в переходных режимах за счет подключения дополнительных электростанций.

#### 4.2.2. Автономная система электроснабжения для ЭТК АВО газа

Проведенный в первой главе диссертации обзор мощности потребления электроэнергии ГП за расчетный период показал, что максимальная доля потребления электрической энергии в наиболее загруженный период эксплуатации осуществляется за счет работы многодвигательной системы ЭТК АВО газа с прямой системой пуска. Отсутствие автономной СЭС для ЭТК АВО ставит под угрозу обеспечение технологических процессов добычи и подготовки газа в аварийных режимах эксплуатации при полном исчезновении напряжения от централизованной системы электроснабжения.

Для определения количества и мощности ДЭС [100-101] необходимо выполнить расчет для следующих условий:

- 1) характер нагрузки индуктивный (см. таблицу 2.7);
- 2) режим работы (использования) ДЭС - резервный,
- 3) температура окружающей среды ( $-55^{\circ}\text{C} - +36^{\circ}\text{C}$ );
- 4) высота над уровнем моря – 1000 м;

Результаты расчетов представлены в таблице 4.7.

Таблица 4.7 – Результаты расчета мощности для ДЭС с автономной системой электроснабжения

№	Диспетчерское наименование	Суммарная мощность нагрузки, кВт	Номинальная расчетная нагрузка ДЭС, кВт	Расчетное активное значение мощности, кВт	Расчетное полное значение мощности, кВА
1	11ТП-2	1776	1962	2178	2722
2	11ТП-21(22)	1924	2126	2360	2950
3	11ТП-23(24)	1480	1635	1815	2268

Исходя из полученных величин расчетной мощности, окончательно выбирается ДЭС, мощность которой лежит в вычисленном допустимом диапазоне мощностей – 2200кВт (№1); 2400 кВт (№2); 2000 кВт (№3). Анализ каталогов [102-106] известных производителей ДЭС блочного типа исполнения определил проблему дефицита указанных мощностей для отечественного рынка, а также завышенную стоимость по сравнению с установкой нескольких ДЭС с аналогичной суммарной мощностью [107]. Одним из вариантов решения построения автономной СЭС для ЭТК АВО газа является установка вместо одного двух ДЭС меньшей мощности по схеме ЭТК-2 (рисунок 4.8) с прямой системой пуска. В соответствие с вычисленными значениями мощности были подобраны ДЭС со следующими характеристиками (таблица 4.8).

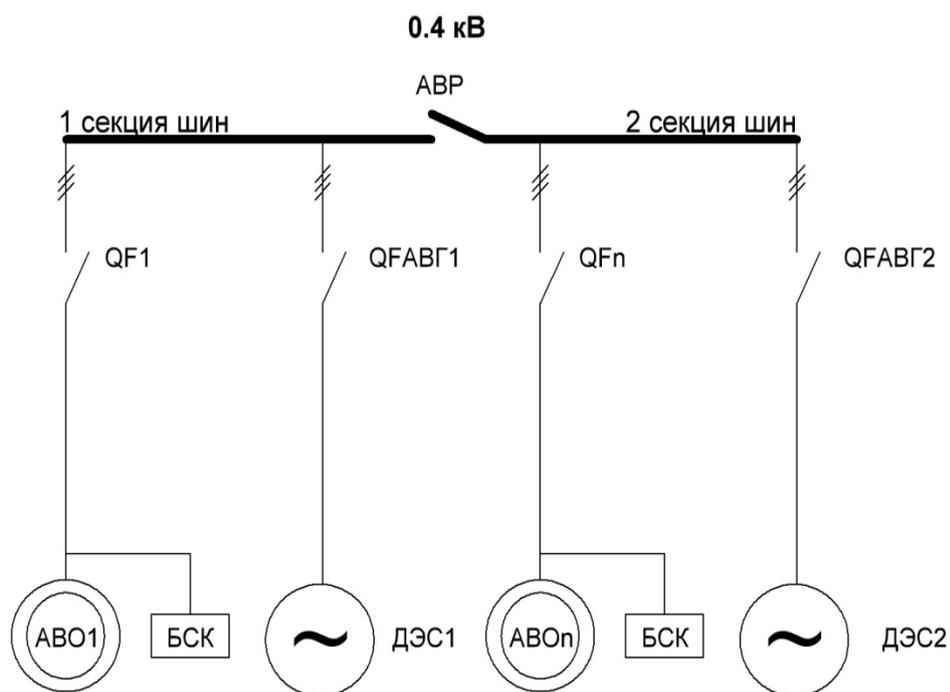


Рисунок 4.8 – Схема построения ЭТК-2 с прямой системой пуска:  
QFABГ– автомат включения генератора; АВР – автоматическое включение резерва.

Таблица 4.8 – Технические характеристики ДЭС-1 (ДЭС-2)

Параметры	Вариант №1	Вариант №2	Вариант №3
модель	AD-1650C	AD-2000C	AD-1540C
полная мощность, кВА	1500	1875	1400
активная мощность, кВт	1200	1500	1120
частота вращения, об/мин	1500		
напряжение, В	400		
коэффициент мощности	0,8		
модель двигателя	КТА50GS8	QSK60-G3	КТА50G8
двигатель	Cummins		
род тока	переменный		
кол-во фаз	3		
частота, Гц	50		
регулятор оборотов двигателя	электронный		
система запуска	электростартер		
номинальная сила тока, А	2381А	2706	2016

Произведем оценку диапазона наименьшего времени включения вентилятора без перегрузки автономного источника электроэнергии при последовательном пуске ЭТК на компьютерной модели в автоматическом

режиме пуска (рисунок 4.9, рисунок Ж.1). Граничные условия определяем при работе ДЭС-1(2) на одну СШ (рисунок 4.10) и при совместной работе ДЭС-1 и ДЭС-2 (единый комплекс генерации) на две СШ (рисунок 4.11):

- 1) для 11ТП-2 (ДЭС-1 – 24 вентилятора; ДЭС-1+ДЭС-2 – 48 вентиляторов);
- 2) для 11ТП-21(22) (ДЭС-1 – 24 вентилятора; ДЭС-1+ДЭС-2 – 48 вентиляторов);
- 3) для 11ТП-23(24) (ДЭС-1 – 24 вентилятора; ДЭС-1+ДЭС-2 – 48 вентиляторов).

Граничные условия для 11ТП-2, 11ТП-21(22), 11ТП-23(24) сведем в таблицу 4.9.

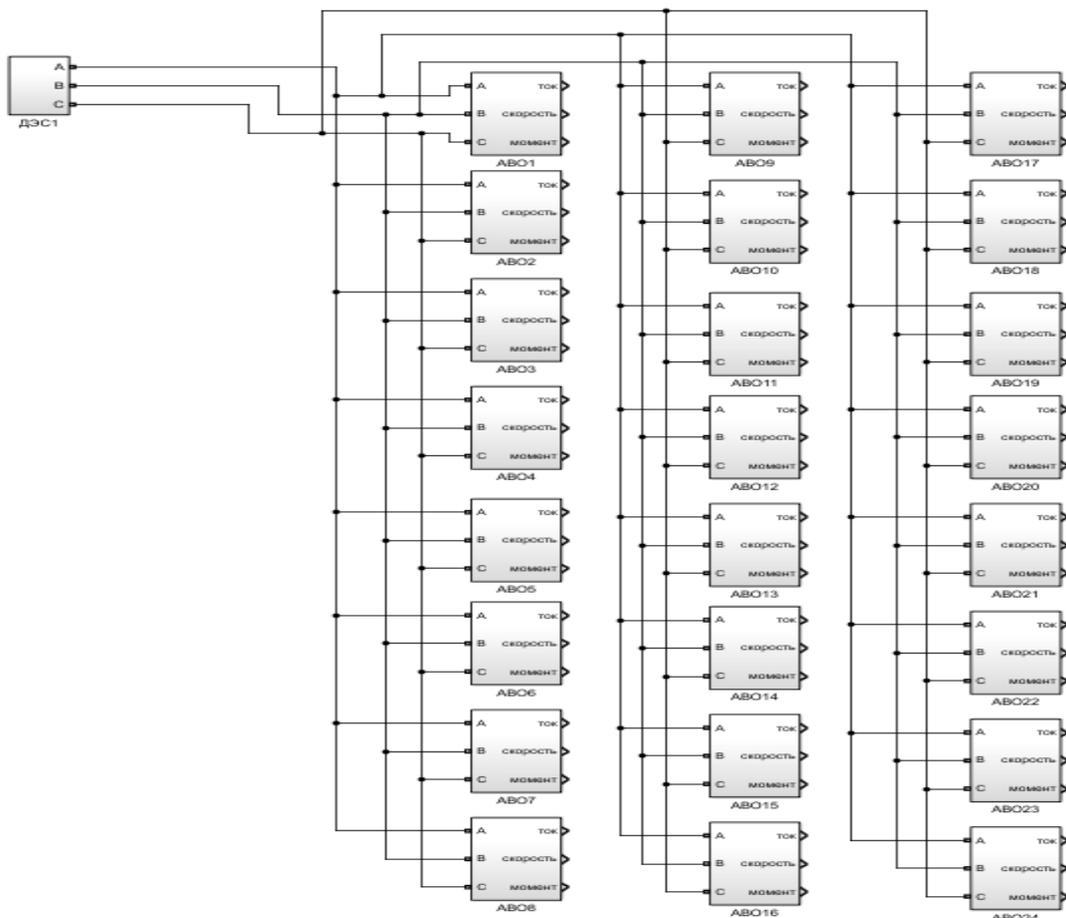


Рисунок 4.9 – Модель работы автономной системы электроснабжения ЭТК АВО газа с ДЭС-1

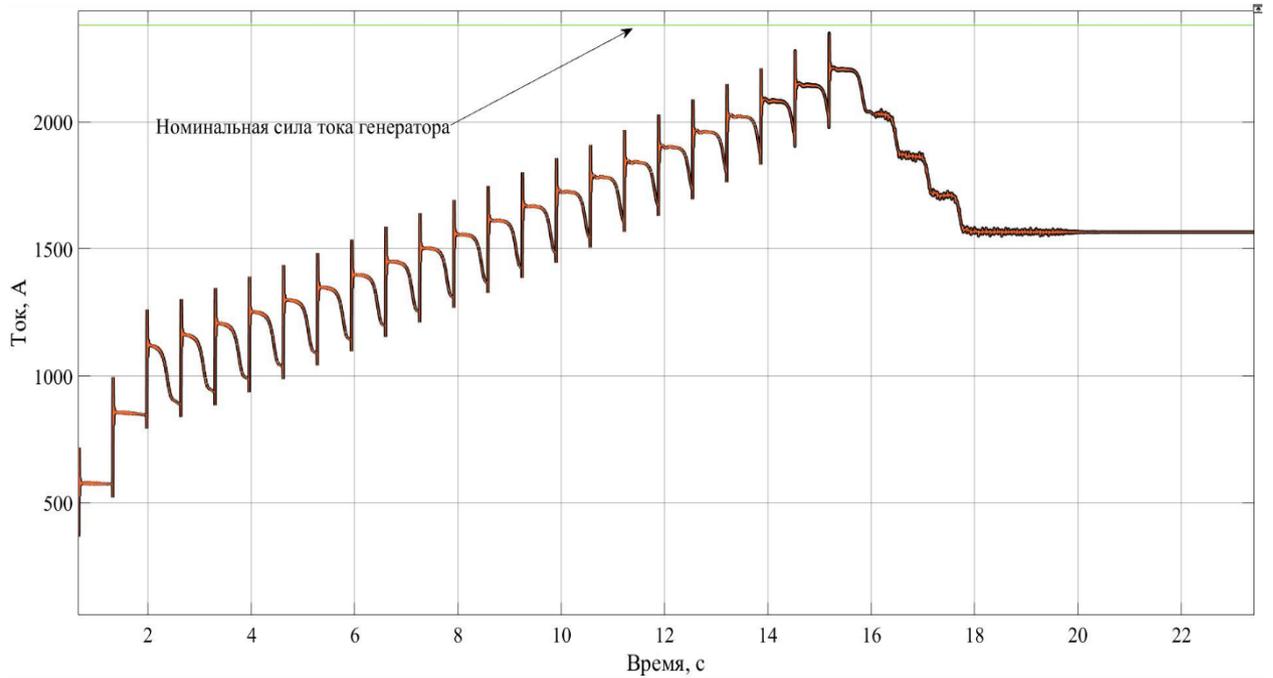


Рисунок 4.10 – Граничные условия при последовательном пуске с ДЭС-1

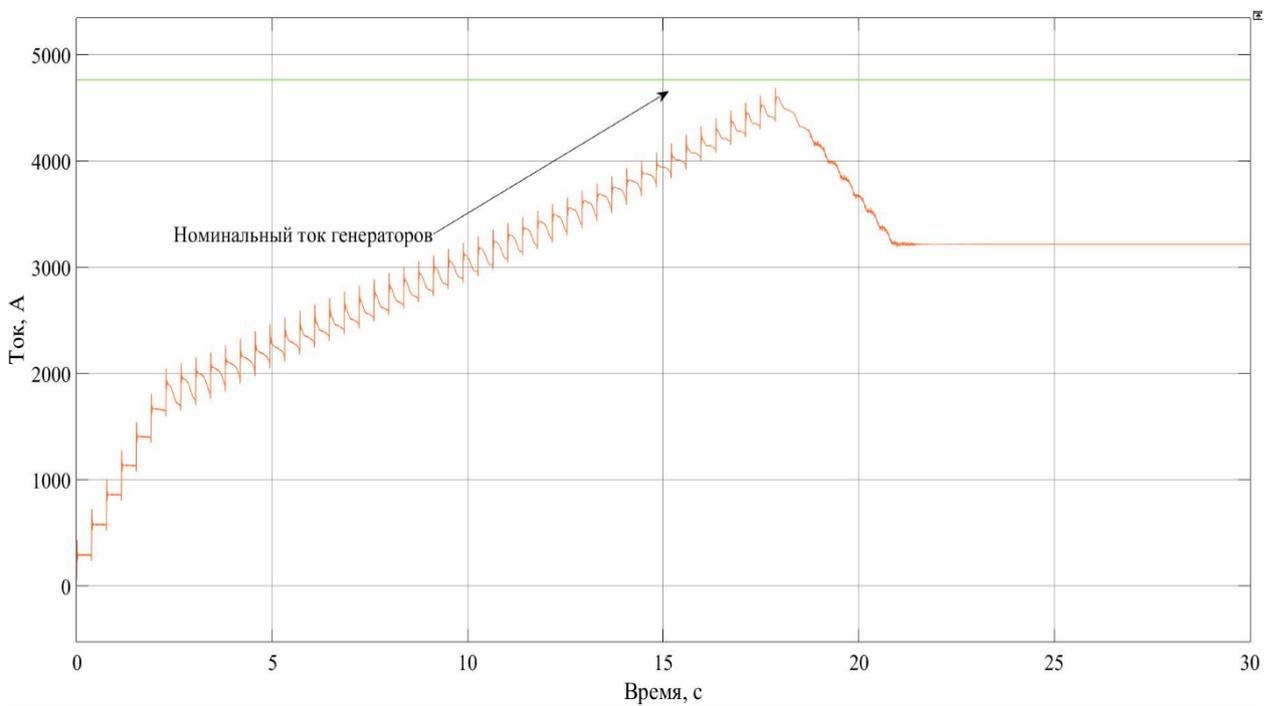


Рисунок 4.11 – Граничные условия при последовательном пуске с ДЭС-1 и ДЭС-2

Таблица 4.9 – Граничные условия при последовательном пуске вентиляторов АВО газа для автономной системы электроснабжения

диспетчерское наименование	кол-во АВО, ед.	граничные условия	общее время запуска, с
11ТП-2	24	$y = 99.452 * x + 879.022$	18-20
	48	$y = 191.549 * x + 1316.414$	22.5-23
11ТП-21(22)	24	$y = 116.404 * x + 955.2242$	21-22
	48	$y = 213.3704 * x + 1390.404$	20-22
11ТП-22(23)	24	$y = 85.3534 * x + 729.8523$	21-22
	48	$y = 184.151 * x + 1243.089$	19-20

Применение последовательного пуска вентиляторов АВО газа в автоматическом режиме в аварийных условиях эксплуатации (кратковременное исчезновение напряжения или при переходе на другой источник питания) позволит сократить общее время запуска по сравнению с ручным пуском, который осуществляет местный оперативный персонал в пределах от 92,67 до 94 % для 24 вентиляторов, и от 92,34 до 93,67 % для 48 вентиляторов АВО газа без перегрузки источника электроэнергии. Проектирование автономной системы электроснабжения позволит обеспечить электроснабжение для АВО газа компрессорных станций в условиях вечномерзлых грунтов при исчезновении напряжения от централизованного источника питания (СТО Газпром 2-6.2-1028-2015), сократить расход дизельного топлива, увеличить ресурс работы двигателей ДЭС за счет увеличения коэффициента загрузки.

## Выводы по четвертой главе

1. Даны методические рекомендации по совершенствованию работы существующего ЭТК ГП с централизованной системой электроснабжения. Разработан алгоритм и функциональная силовая схема для ЭТК АВО газа с комбинированной системой запуска «СПП + ПЧ» в составе трехуровневой системы САУ. Проведено компьютерное моделирование, где были определены потери в пусковых режимах для системы прямого пуска, с использованием преобразователя частоты и системы плавного пуска.

2. Решена проблема перегрузки источника питания для электротехнического комплекса теплоснабжения промысла. Были представлены решения на компьютерной модели, которые обеспечили пуск насосов узла подключения теплоносителя без перегрузки источника электроэнергии.

3. Даны методические рекомендации по совершенствованию работы существующего ЭТК ГП с автономной системой электроснабжения за счет создания единого комплекса генерации электрической энергии (ЭТК-2). Исследование показало, что внедрение ЭТК-2 позволит: обеспечить снижение перерасхода дизельного топлива, увеличить годовой средневзвешенный коэффициент загрузки, повысить перегрузочную способность ДЭС в переходных режимах за счет подключения дополнительных электростанций.

4. Предложен вариант построения автономной системы электроснабжения для ЭТК АВО газа по схеме ЭТК-2. Решения на компьютерной модели показали, что внедрение ЭТК-2 с алгоритмом группового последовательного запуска в автоматическом режиме позволит существенно сократить общее время запуска по сравнению с ручным пуском, которым в настоящее время осуществляет местный оперативный персонал.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

### Основные выводы:

1. Проведен анализ структуры, оценка технико-энергетических параметров и эффективности работы электротехнического комплекса газового промысла №1 ООО «Газпром добыча Ямбург» с централизованной и автономной системой электроснабжения. Установлено, что электротехнический комплекс газового промысла является сложной технической системой с переменной структурой. Выявленные в ходе исследования особенности функционирования и недостатки электротехнического комплекса указывают на наличие резервных возможностей повышения эффективности, что является актуальной задачей.

2. Разработана компьютерная модель электротехнического комплекса газового промысла с централизованной системой электроснабжения. Сравнительный анализ показал сходимость результатов значения времени пуска асинхронного двигателя серии ВАСО16-14-24 (ВАСО4-37-24) со стеклопластиковым рабочим колесом типа ГАЦ-50-4М2 на валу на разработанной компьютерной модели с экспериментальными данными в диапазоне до 6-7%, что говорит о высокой степени достоверности модели к реальному объекту газового промысла.

3. Разработана трехступенчатая защита от гидратообразования в трубках теплообменного аппарата воздушного охлаждения газа типа 2АВГ-75С. Был предложен алгоритм включения каждого вентилятора в секции АВО газа, обеспечивающий снижение гидратообразования за счет увеличения пути прохождения теплого газа через секцию теплообменного аппарата. Разработаны алгоритмы работы исполнительных механизмов (жалюзи), реверса в составе трехуровневой системы автоматического управления.

4. Разработан алгоритм автоматического группового запуска вентиляторов АВО газа без перегрузки источника электроэнергии в

автоматическом режиме пуска. Получены аппроксимирующие зависимости для группы вентиляторов АВО газа с помощью, которых был определен наименьший промежуток времени для последовательных пусков без перегрузки источника питания в автоматическом режиме запуска. Результаты моделирования показали, что было сокращено общее время запуска по сравнению с ручным пуском в пределах от 92,67 до 94 % для 24 вентиляторов.

5. Разработан и запатентован алгоритм управления и функциональные силовые схемы для систем пуска с использованием преобразователей частоты, систем плавного пуска по схемам: «один ПЧ (СПП) – один вентилятор», «один ПЧ (СПП) – группа вентиляторов», «комбинированный (СПП+ПЧ)» (рисунок И.1). Результаты исследования показали практическую значимость и эффективность в производственном процессе, получен акт об использовании объекта патентных прав на ГП №1 ООО «Газпром добыча Ямбург» (рисунок К.1).

6. Разработаны методические рекомендации по совершенствованию эффективности работы электротехнического комплекса с централизованной и автономной системой электроснабжения. Было установлено, что использование комбинированного метода управления для вентиляторов АВО газа дает снижение потерь мощности при пусках по сравнению с прямой системой пуска в диапазоне до 77%. Решена проблема перегрузки источника питания для электротехнического комплекса газового промысла. Были представлены решения на компьютерной модели, которые обеспечили пуск насосов узла подключения теплоносителя с выдержкой времени в диапазоне 5-6 секунд с прямым пуском без перегрузки источника электроэнергии. Была доказана технологическая и экономическая эффективность предложенного способа объединения нескольких отдельных ДЭС в единый центр генерации, который показал увеличение годового средневзвешенного коэффициента загрузки до 23,53 % и снижение расхода дизельного топлива до 9,265 % по сравнению с существующим электротехническим комплексом газового

промысла с автономной системой электроснабжения.

Задачи, поставленные в данном диссертационном исследовании, решены в полном объеме. Цель диссертационной работы достигнута.

#### **Рекомендации.**

Подходы, используемые в разработанной компьютерной модели электротехнического комплекса газового промысла на основе расчетно-экспериментальных данных в программном комплексе MATLAB/SIMULINK, могут быть использованы для любых асинхронных двигателей серии ВАСО и установленных на их валу рабочих колес.

#### **Перспективы дальнейшей разработки темы исследования.**

Тенденциями дальнейшего приоритетного развития результатов диссертационного исследования являются:

1) совершенствование методов повышения эффективности электротехнических комплексов и средств оценки технического состояния электрооборудования газового промысла с учетом параметров эксплуатации;

2) создание компьютерной модели дизельной электростанции, в которой учитывается расход дизельного топлива в зависимости от параметров загрузки и климатических условий эксплуатации.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Меньшов, Б. Г. Электротехнические установки и комплексы в нефтегазовой промышленности / Б.Г. Меньшов, И.И Суд. – Москва: Недра, 1984. – 416 с.
2. Меньшов, Б.Г. Электрификация предприятий нефтяной и газовой промышленности / Б.Г. Меньшов, М.С. Ершов, А.Д. Яризов. – М.: Недра, 2000. – 72с.
3. Шклярский, Я.Э. Оценка энергетической эффективности электротехнического комплекса / Я.Э. Шклярский, Е.Н. Замятина, Е.О. Замятина // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2020. – № 3. – С. 339-347.
4. Ершов, М.С. Определение параметров источников питания электротехнических комплексов с электродвигательной нагрузкой / М.С. Ершов, Р.Н. Конкин // В сборнике: Культура, наука, образование: проблемы и перспективы. Материалы VI международной научно-практической конференции, 2017. – С. 130-133.
5. Козярук, А.Е. Энергоэффективные электротехнические комплексы горнодобывающих и транспортных машин / А.Е. Козярук // Записки Горного института. – 2016. – Т. 218. – С. 261-269.
6. Ortega, A. Generalized model of vsc-based energy storage systems for transient stability analysis / A. Ortega, F. Milano // IEEE Transactions on Power Systems. – 2016. – vol. 31. – no. 5. – pp. 3369–3380.
7. Jain, A. A model predictive control design for selective modal damping in power systems / A. Jain, E. Biyik, A. Chakraborty // in Proc. of American Control Conference. – 2015. – pp. 4314–4319.
8. Xiaodong Liang. Innovative design and feasibility study for a subsea electrical submersible pump system / Liang Xiaodong // 2016 IEEE/IAS 52nd Industrial and Commercial Power Systems Technical Conference (I&CPS). Conference Paper. Publisher: IEEE. Date of Conference: 1-5 May 2016.

9. Hussain, A. H. A control method for linear permanent magnet electric submersible pumps in a modified integrated drive-motor system / A.H. Hussain, Anvari Bahareh, A.T. Toliyat // 2017 IEEE International Electric Machines and Drives Conference (IEMDC). Conference Paper. Publisher: IEEE. Date of Conference: 21-24 May 2017.

10. Lucio, Steckling. Model-Based Synchronous Optimal Modulation for Three-Level Inverters Applied to Electrical Submersible Pumps Systems / Steckling Lucio, Marcelo Lobo Heldwein // PCIM Europe 2019; International Exhibition and Conference for Power Electronics, Intelligent Motion, Renewable Energy and Energy Management. Publisher: VDE. Date of Conference: 7-9 May 2019.

11. Xiaodong, Liang. Factors Affecting Electrical Submersible Pump Systems Operation / Liang Xiaodong, Ahmad El-Kadri // 2018 IEEE Electrical Power and Energy Conference (EPEC). Conference Paper. Publisher: IEEE. 10-11 Oct. 2018.

12. Xiaodong , Liang. Downhole Tool Design for Conditional Monitoring of Electrical Submersible Motors in Oil Field Facilities / Liang Xiaodong, Omid Ghoreishi, Wilsun Xu. // IEEE Transactions on Industry Applications. – 2017. –Vol. 53. – no.3. – pp. 3164-3174.

13. Jorge, Andrés Prada Mejía. Control Strategy for Oil Production Wells with Electrical Submersible Pumping Based on the Nonlinear Model-Based Predictive Control Technique / Andrés Prada Mejía Jorge, Luis Angel Silva, Julián Andrés Peña Flórez // 2018 IEEE ANDESCON. Conference Paper. Publisher: IEEE. Date of Conference: 22-24 Aug. 2018.

14. Ramli, M. A. Economic analysis of PV/diesel hybrid system with flywheel energy storage / M. A. Ramli, A. Hiendro, S. Twaha // Renew. Energy. –2015. – Vol. 78. – pp. 398-405.

15. Ершов, М.С. Моделирование надежности систем электроснабжения с автономными источниками питания / М.С. Ершов,

Р.Б. Жалилов // В сборнике: Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики в 2-х книгах, 2019. – С. 353-361.

16. Савенко, А.Е. Работа многогенераторного автономного электротехнического комплекса / А.Е. Савенко, С.Е. Савенко // Материалы III Международной научно-практической конференции «Достижения, проблемы и перспективы развития нефтегазовой отрасли». – Альметьевск: Альметьевский государственный нефтяной институт, 2018. – С. 465-469.

17. Gorodnov, A.G. The methodology for design of autonomous power supply system of oil producing company optimized on length and number of generation centers / A.G. Gorodnov, V.Yu. Kornilov, Al-Ali M.A. Abdulhy // Power engineering: research, equipment, technology. – 2020. – Vol. 22. – N1. – pp. 69-76.

18. Abdulhy, Al-Ali M.A. Optimized the performance of electrical equipment in gas separation stations (Degassing stations) and electrical submersible pumps of oil equipment for oil Rumaila field / Al-Ali M.A. Abdulhy, V.Yu. Kornilov, A.G. Gorodnov // Power engineering: research, equipment, technology. – 2019. – Vol. 21, N (1-2). – pp. 141-145.

19. Abdulhy, Al-Ali M.A. Optimal operation of electrical power generators for wells operated by artificial lifting at Rumaila field / Al-Ali M.A. Abdulhy, V.Y. Kornilov, A.G. Gorodnov // Proceedings of the higher educational institutions. ENERGY SECTOR PROBLEMS. – 2018. – Vol.20. – N (11-12). – pp. 127-132.

20. Мваку, У.М. Электротехнические комплексы технологических комплексов основного оборудования эксплуатации скважин / У.М. Мваку, В.Ю. Корнилов // Вестник Казанского государственного энергетического университета. – 2013. – № 1 (16). – С. 34-46.

21. Городнов, А.Г. Оценка энергоэффективности электротехнического комплекса нефтедобывающего предприятия с автономной системой электроснабжения / А.Г. Городнов // Инновационная наука в глобализующемся мире. – 2020. – № 1 (7). – С. 30-31.

22. Технологический регламент на эксплуатацию газового промысла №1 (УКПГ и ДКС) Ямбургского НГКМ: Типовой проект: 05.087-ТХР-15. – Ростов н/Д, 2010. – 264 с.

23. ГОСТ 32144 - 2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. Введ. 2014.07.01. М.: Стандартинформ, 2013. – 19 с.

24. Отчет об обязательном энергетическом обследовании ООО «Газпром добыча Ямбург». – Москва, 2018. – 225 с.

25. Радкевич, В. Н. Проектирование систем электроснабжения / В. Н. Радкевич. Минск: НПООО «Пион», 2001. – 292 с.

26. Масков, Л. Р. Модернизация автономной системы электроснабжения газового промысла №1 ООО «Газпром добыча Ямбург» / Л.Р. Масков, В.Ю. Корнилов // Современные проблемы энергетики и пути их решения: Материалы VI Всероссийской научно-технической конференции, Махачкала, 15–16 декабря 2021 года. Махачкала: Типография ФОРМАТ, 2021. – С. 124-130.

27. Масков, Л. Р. Анализ электрических потерь в автономной системе электроснабжения газового промысла / Л.Р. Масков, В.Ю. Корнилов // Приоритетные направления инновационной деятельности в промышленности: Сборник научных статей по итогам II международной научной конференции. Казань, 27–28 февраля 2021 года. Казань: Общество с ограниченной ответственностью "КОНВЕРТ", 2021. – С. 88-90.

28. Кабышев, А.В. Электроснабжение объектов. Ч.1. Расчет электрических нагрузок, нагрев проводников и электрооборудования / А.В. Кабышев. – Томск: изд-во Томского политехнического университета, 2007. – 185с.

29. Справочные данные по расчетным коэффициентам электрических нагрузок. – М.: ВНИПИ «Тяжпромэлектропроект», 1990. – 114 с.

30. Лукутин, Б.В. Способы снижения расхода топлива дизельных электростанций / Б.В. Лукутин, Е.Б. Шандарова // В сборнике: Природные ресурсы и экология Дальневосточного региона. Материалы Международного научно-практического форума, 2013. – С. 393-397.

31. Некоторые аспекты применения частотно-регулируемого электропривода, в системах воздушного охлаждения компримированного газа / И.И. Артюхов, И.И. Аршакян, М.В. Жабский [и др.]. // Вестник Саратовского государственного технического университета. – 2006. – Т.1. – № 1(10). – С. 29-39.

32. Масков, Л.Р. Анализ структуры и энергетических параметров электротехнического комплекса газового промысла №1 ООО "Газпром добыча Ямбург" / Л.Р. Масков, В.Ю. Корнилов // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2021. – Т. 23. – № 6. – С. 66-86.

33. Энергетическая эффективность установок охлаждения природного газа с частотно-регулируемым приводом вентиляторов / А.М. Абакумов, В.Е. Антропов, А.С. Ведерников, О.А. Абакумов // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Технические науки. – 2019. – № 3(63). – С. 94-104.

34. Способ интенсификации теплообмена на основе интеллектуального управления режимными характеристиками теплообменного оборудования / К. Х. Гильфанов, Р.А. Шакиров, Р.Н. Гайнуллин, Ф.В. Коннов // Вестник Казанского государственного энергетического университета. – 2022. – Т. 14. – № 4(56). – С. 91-102.

35. Васенин, А.Б. Анализ технических и экономических показателей применения аппаратов воздушного охлаждения газа на компрессорных станциях / А.Б. Васенин // Автоматизация и ИТ в нефтегазовой области. – 2018. – № 3(33). – С. 10-19.

36. Данилушкин, А.И. Эффективное управление функционированием электротехнического комплекса подготовки газа к транспортировке по

магистральному трубопроводу / А.И. Данилушкин, В.А. Данилушкин // Градостроительство и архитектура. – 2021. – Т. 11. – № 2(43). – С. 162-170.

37. Борисов, Д.С. Автоматизация системы управления аппаратом воздушного охлаждения газа на компрессорной станции / Д.С. Борисов, Д.А. Даденков // Автоматизированные системы управления и Информационные технологии: Материалы всероссийской научно-технической конференции. В двух томах. Пермь. 09–11 июня 2020 года. Том 1. – Пермь: Пермский национальный исследовательский политехнический университет, 2020. – С. 438-443.

38. Андриевская, Н.В. Система управления процесса охлаждения в аппарате воздушного охлаждения газа / Н.В. Андриевская, В.О. Раскошинский // Научно-технический вестник Поволжья. – 2018. – № 12. – С. 185-188.

39. Пашкин, В.В. Способ управления частотно-регулируемым приводом аппарата воздушного охлаждения газа при двухступенчатом охлаждении / В.В. Пашкин, О.Н. Ивашкин, В.А. Шабанов // Электронный научный журнал Нефтегазовое дело. – 2019. – № 3. – С. 177-194.

40. Патент № 2783037 С1 Российская Федерация, МПК E21В 43/34, F17D 3/01, F25J 3/08. Способ автоматического поддержания температурного режима на установках низкотемпературной сепарации газа с аппаратами воздушного охлаждения на Крайнем Севере РФ: № 2022106777: заявл. 15.03.2022: опубл. 08.11.2022 / О. Б. Арно, А. К. Арабский, А. Л. Агеев [и др.]; заявитель Общество с ограниченной ответственностью "Газпром добыча Ямбург".

41. Аршакян, И.И. Повышение эффективности электротехнических комплексов установок охлаждения газа: специальность 05.09.03 "Электротехнические комплексы и системы": диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Аршакян Игорь Ишханович. – Саратов, 2004. – 160 с.

42. Результаты экспериментальных исследований процессов пуска, самозапуска и выбега электродвигателей АВО газа на дожимной компрессорной станции / М. И. Божков, В. В. Дмитрук, С. В. Доронин, В. Б. Ульянов // Промышленная энергетика. – 2022. – № 3. – С. 28-35.

43. Аршакян, И.И. Компенсация реактивной мощности в системах электроснабжения аппаратов воздушного охлаждения газа / И. И. Аршакян, И. И. Артюхов, С. Ф. Степанов // Вестник Саратовского государственного технического университета. – 2004. – № 1(2). – С. 92-100.

44. Патент № 2205298 С1 Российская Федерация, МПК F04D 29/32. рабочее колесо осевого вентилятора: № 2001131405/06: заявл. 23.11.2001: опубл. 27.05.2003 / В. А. Маланичев, А. А. Ефремов, Е. Г. Зайцев, А. М. Галюченко; заявитель Закрытое акционерное общество "Гидроаэроцентр".

45. Хворов, Г.А. Анализ энергосберегающих технологий охлаждения газа на основе аппаратов воздушного охлаждения в транспорте газа ПАО "Газпром" / Г.А. Хворов, М.В. Юмашев, В.А. Маланичев // Научный журнал Российского газового общества. – 2016. – № 3. – С. 32-37.

46. Патент № 2205991 С1 Российская Федерация, МПК F04D 29/38. способ изготовления лопастей вентиляторов: № 2001130321/06: заявл. 12.11.2001: опубл. 10.06.2003 / В. А. Маланичев, А. А. Ефремов, Е. Г. Зайцев, А.М. Галюченко; заявитель Закрытое акционерное общество "Гидроаэроцентр".

47. Qiong, W. Parameter Estimation of Three-phase Transformer Models for Low-frequency Transient Studies from Terminal Measurements / W. Qiong, J. Saeed, L. Francisco // IEEE Trans. Magnetics. – 2017. – V. 53.N7. – pp. 1-8.

48. Low-frequency model for single-phase transformers based on the three-component Preisach model considering deep saturation / S. Wenxia, P. Daixiao, Y. Ming., et al. // International Journal of Electrical Power & Energy Systems. – 2018. – Vol. 110, N2. – pp. 107-117.

49. Новаш, И.В. Расчет параметров модели трехфазного трансформатора из библиотеки MATLAB-SIMULINK с учетом насыщения

магнитопровода / И.В. Новаш, Ю.В. Румянцев // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. – 2015. – № 1. – С. 12-24.

50. SimPower Systems. User's Guide Version 3. The MathWorks, Inc, 2003. – 620 p.

51. Wu, B. High-Power converters and AC drives / B. Wu, M. Narimani // Wiley-IEEE Press, 2nd ed. – 2017.

52. Кузнецов, Е.М. Идентификация параметров схемы замещения асинхронного электродвигателя в программной среде Multisim / Е.М. Кузнецов, Д.Д. Зубов, Р.В. Кошман // Актуальные вопросы энергетики: материалы Всероссийской научно-практической конференции с международным участием; 17 мая 2018 г., Омск: ОГТУ, 2018. – С. 248-251.

53. Анализ спектральных характеристик тока асинхронного электропривода / В.Г. Макаров, И.Г. Цвенгер, А.М. Шаряпов [и др.] // Вестник Технологического университета. – 2018. – Т. 21. – № 7. – С. 80-86.

54. Zhen, G. The Study on Mathematical Model and Simulation of Asynchronous Motor Considering Iron Loss / G. Zhen, Z. Qing-wei // Journal of Physics: Conference Series. – 2018. – Vol. 1060.

55. Пиляев, С.Н. Обоснование параметров схемы замещения асинхронного электродвигателя / С.Н. Пиляев, Д.Н. Афоничев // Вестник Воронежского государственного аграрного университета. – 2020. – Т. 13. – № 4 (67). – С. 129-138.

56. Гридин, В.М. Расчет характеристик асинхронных двигателей по каталожным данным / В.М. Гридин // Электричество. – 2018. – № 9. – С. 44-48.

57. Мясовский, В.А. Исследование методов расчета параметров схемы замещения асинхронного двигателя по данным каталога производителя / В.А. Мясовский // Молодой ученый. – 2020. – № 20 (310). – С. 127-133.

58. Фаттахов, К.М. Метод определения параметров схемы замещения асинхронной машины по паспортным и каталожным данным/

К.М. Фаттахов, Р.К. Фаттахов. // Электропривод, электротехнологии и электрооборудование предприятий: сборник научных трудов конференции; 08–09 апреля 2011 г., Уфа: УГНТУ, 2011. – С. 123-131.

59. Мощинский, Ю.А. Определение параметров схемы замещения асинхронных двигателей по каталожным данным / Ю.А. Мощинский, В.Я. Беспалов, А.А. Кирякин // Электричество. – 1998. – №4. – С. 38-42.

60. Влияние загрузки электродвигателей на коэффициенты полезного действия и мощности [Электронный ресурс] // Режим доступа: <http://electricalschool.info/spravochnik/maschiny/1113-vlijanie-zagruzki-jelektro-dvigatelejj.html>. (дата обращения 21.01.2024).

61. Лезнов, Б.С. Энергосбережение и регулируемый электропривод в насосных и воздуходувных установках / Б.С. Лезнов. – М.: Энергоатомиздат, 2006. – 360 с.

62. Электропривод вентиляционной установки [Электронный ресурс] // Режим доступа: <https://works.doklad.ru/view/1aTyWgvjBKc/2> (дата обращения 01.04.2024).

63. Справочник. Кабели. [Электронный ресурс] // Режим доступа: <https://k-ps.ru/spravochnik/kabeli-silovyie.html> (дата обращения 01.04.2024).

64. Масков, Л.Р. Методика определения инерционных характеристик мехатронного модуля движения аппарата воздушного охлаждения газа / Л.Р. Масков, В.Ю. Корнилов // Российская наука в современном мире: Сборник статей II международной научно-практической конференции, Москва, 28 февраля 2023 года. – Москва: Общество с ограниченной ответственностью "Актуальность. РФ", 2023. – С. 52-53.

65. Кочергина, А.Д. Экспериментальное определение момента инерции установки методом свободного выбега / А.Д. Кочергина, А.Н. Пахомов // Студенческий форум. – 2021. – № 41-2(177). – С. 22-25.

66. Масков, Л.Р. Разработка модели электротехнического комплекса для газовых промыслов в программе MATLAB/Simulink / Л.Р. Масков, В.Ю. Корнилов // Современные цифровые технологии: проблемы, решения,

перспективы: национальная (с международным участием) научно-практическая конференция. Казань, 19–20 мая 2022 года. – Казань: Казанский государственный энергетический университет, 2022. – С. 248-251.

67. Масков, Л.Р. Разработка модели электротехнического комплекса для аппаратов воздушного охлаждения газа газового промысла №1 ООО "Газпром добыча Ямбург" с централизованной системой электроснабжения в программе MATLAB/SIMULINK / Л.Р. Масков, В.Ю. Корнилов // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2022. – Т. 24, № 2. – С. 50-71.

68. Масков, Л.Р. Расчетно-экспериментальное исследование инерционных характеристик мехатронных модулей движения аппаратов воздушного охлаждения газа / Л.Р. Масков, В.Ю. Корнилов // Наука и техника в газовой промышленности. – 2023. – № 3(95). – С. 50-59.

69. Абакумов, А.М. Комбинированное управление электроприводами вентиляторов установок охлаждения газа / А.М. Абакумов, П.К. Кузнецов // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Технические науки. – 2021. – Т.29. – №3(71). – С.67-82.

70. Чернышев, И.А. Исследование асинхронного частотно-регулируемого электропривода аппарата воздушного охлаждения газа / И.А. Чернышев, Т.А. Чернышева // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. – 2014. – Т.1. – № 3(19). – С.30-38.

71. Патент № 2291474 С2 Российская Федерация, МПК G05D 1/00, F28F 27/00. система автоматического управления аппаратами воздушного охлаждения природного газа: № 2004117656/28: заявл. 09.06.2004: опубл. 10.01.2007 / Г. А. Ланчаков, В. А. Ставицкий, А. Н. Кульков [и др.]; заявитель Общество с ограниченной ответственностью "Уренгойгазпром", ГОУВПО "Уфимский государственный нефтяной технический университет".

72. Патент № 2684767 С1 Российская Федерация, МПК F04D 27/00, F28F 27/00. Система автоматического управления аппаратом воздушного

охлаждения природного газа: № 2018107012: заявл. 26.02.2018: опубл. 12.04.2019 / А. М. Абакумов, И. П. Степашкин; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждения высшего образования "Самарский государственный технический университет".

73. Абакумов, А.М. Исследование систем автоматического управления аппаратами воздушного охлаждения природного газа / А.М. Абакумов, И.П. Степашкин // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Технические науки. – 2018. – № 2(58). – С.92-100.

74. Мигачев, А. В. Совершенствование систем автоматического управления аппаратами воздушного охлаждения газа с частотно-регулируемым приводом вентиляторов: специальность 05.09.03 "Электротехнические комплексы и системы": диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Мигачев Алексей Викторович; Самарский государственный технический университет. – Самара, 2017. – 144 с.

75. Патент на полезную модель № 124935 U1 Российская Федерация, МПК F04D 27/00. система управления аппаратами воздушного охлаждения: № 2012139740/06: заявл. 17.09.2012: опубл. 20.02.2013 / Р. Ш. Тарисов, А. А. Тримбач, И. И. Артюхов [и др.].

76. Патент № 2330993 С2 Российская Федерация, МПК F04D 27/00. Система управления аппаратами воздушного охлаждения: № 2006108604/06: заявл. 21.03.2006: опубл. 10.08.2008 / Н. А. Ручьев, К. С. Хромов.

77. Патент № 2291474 С2 Российская Федерация, МПК G05D 1/00, F28F 27/00. система автоматического управления аппаратами воздушного охлаждения природного газа: № 2004117656/28: заявл. 09.06.2004: опубл. 10.01.2007 / Г. А. Ланчаков, В. А. Ставицкий, А. Н. Кульков [и др.]; заявитель Общество с ограниченной ответственностью "Уренгойгазпром", Государственное образовательное учреждение высшего профессионального

образования "Уфимский государственный нефтяной технический университет".

78. Система автоматизированного управления агрегатами воздушного охлаждения газа. [Электронный ресурс] // Режим доступа: <https://www.cheaz.ru/products/lvd/industry/gas-units.html> (дата обращения 14.06.2024).

79. Елов, А.И. Система автоматического управления аппаратами воздушного охлаждения. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://neftegaz.ru/science/view/367-Sistema-avtomaticheskogo-upravleniya-apparatami-vozdushnogo-ohlazhdeniya.html> (дата обращения 14.06.2024).

80. Продукция. Низковольтные комплектные устройства АВОГ-ЧРП [Электронный ресурс] // Режим доступа: <http://npogtm.ru/products/avog-crp> (дата обращения 14.06.2024).

81. САУ АВО газа. Информационная брошюра. [Электронный ресурс] // Режим доступа: <https://kaskad-asu.com/systems/sau-avo-gaza.html> (дата обращения 14.06.2024).

82. Система автоматического управления аппаратами воздушного охлаждения газа САУ АВО. Каталог. [Электронный ресурс] // Режим доступа: <http://www.teploizmerenie.ru/print/450.htm> (дата обращения 14.06.2024).

83. Аппараты воздушного охлаждения. Информационная брошюра. [Электронный ресурс] // Режим доступа: <https://www.bhm.ru/products/urs> (дата обращения 14.06.2024).

84. Садилов, Д.Г. Применение преобразователей частоты на компрессорных станциях магистральных газопроводов / Д.Г. Садилов, Д.С. Мочалин, В.Г. Титов // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – 2014. – № 2(104). – С. 179-189.

85. Ульянов, И.Н. Повышение эффективности работы турбодетандерных агрегатов в составе СОГ КС за счёт регулирования режимов / И.Н. Ульянов // Молодой ученый. – 2022. – № 14(409). – С. 28-29.

86. Патент № 2807138 С1 Российская Федерация, МПК F04D 27/00. Система автоматического управления аппаратами воздушного охлаждения природного газа: № 2023111829: заявл. 04.05.2023: опубл. 09.11.2023 / Л. Р. Масков; заявитель Общество с ограниченной ответственностью "Газпром добыча Ямбург".

87. СТО Газпром 2-3.5-454-2010 «Правила эксплуатации магистральных газопроводов». – Москва, 2010. – 241 с.

88. Почему греется электродвигатель. Электронный справочник [Электронный ресурс] // Режим доступа: <https://tehprivod.su/poleznaya-informatsiya/pochemu-greetsya-elektroprivod.html> (дата обращения 14.06.2024).

89. Когда нет необходимости в плавном пуске двигателя [Электронный ресурс] // Режим доступа: <https://mirprivoda.ru/articles/kogda-net-neobkhodimosti-v-plavnom-puske-dvigatelya> (дата обращения 14.06.2024).

90. Козярук, А.Е. Энергоэффективные электротехнические комплексы горнодобывающих и транспортных машин / А.Е. Козярук // Записки Горного института. – 2016. – Т. 218. – С. 261-269.

91. Abdulhy, Al-Ali M.A. Optimal operation of electrical power generators for wells operated by artificial lifting at Rumaila field. / Al-Ali M.A. Abdulhy, V.Y. Kornilov, A.G. Gorodnov // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2018. – Т. 20. – № 11-12. – С. 127-132.

92. Шклярский, Я.Э. Оценка энергетической эффективности электротехнического комплекса / Я.Э. Шклярский, Е.Н. Замятина, Е.О. Замятин // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2020. – № 3. – с. 339-347.

93. Городнов, А.Г. Оценка энергоэффективности электротехнического комплекса нефтедобывающего предприятия с автономной системой электроснабжения / А.Г. Городнов // Инновационная наука в глобализующемся мире. – 2020. – № 1 (7). – С. 30-31.

94. Xiaodong, L. Downhole Tool Design for Conditional Monitoring of Electrical Submersible Motors in Oil Field Facilities /L. Xiaodong, G. Omid, X. Wilsun // IEEE Transactions on Industry Applications. – 2017. – Vol. 53, N3. – pp. 3164-3174.

95. Савенко, А. Е. Оптимизация использования автономного электротехнического комплекса на объектах нефтегазовой промышленности / А.Е. Савенко, П.С. Савенко // Достижения, проблемы и перспективы развития нефтегазовой отрасли: материалы IV Международной научно-практической конференции; 16–18 октября 2019 г., Альметьевск: АГНИ, 2019. – С. 429-432.

96. Ершов, М.С. Моделирование надежности систем электроснабжения с автономными источниками питания. / М.С. Ершов, Р.Б. Жалилов // В сборнике: Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики в 2-х книгах, 2019. – С. 353-361.

97. Gorodnov, A.G. The methodology for design of autonomous power supply system of oil producing company optimized on length and number of generation centers / A.G. Gorodnov, V.Yu. Kornilov, Al-Ali M.A. Abdulhy // Power engineering: research, equipment, technology. – 2020. – Vol. 22, N1. – pp. 69-76.

98. Масков, Л.Р. Модернизация автономной системы электроснабжения газового промысла № 1 ООО «Газпром добыча Ямбург» / Л.Р. Масков // SCIENCE AND TECHNOLOGY RESEARCH 2022: сборник статей Международной научно-практической конференции, Петрозаводск, 19 апреля 2022 года. Петрозаводск: Международный центр научного партнерства «Новая Наука» (ИП Ивановская И.И.), 2022. – С. 23-30.

99. Гринкруг, М.С. Выбор типов дизель-генераторов на дизельных электростанциях из условий минимального годового расхода топлива / М.С. Гринкруг // Теплоэнергетика. – 2009. – № 11. – С. 18-21.

100. Расчет мощности и выбор ДЭС. Электронный справочник [Электронный ресурс] //Режим доступа: <https://tech->

expo.ru/upload/iblock/0a9/Raschet-moshchnosti-DGU.pdf (дата обращения 14.06.2024).

101. Проектирование ДЭС [Электронный ресурс] //Режим доступа: <https://pes-generator.ru/news/raschjot-moshhnosti-i-vybora-djes> (дата обращения 14.06.2024).

102. Дизельные электростанции Азимут [Электронный ресурс]//Режим доступа: <https://www.gc-azimut.ru/dizel-generatory/2000-kvt/>(дата обращения 14.06.2024).

103.Дизельные генераторы [Электронный ресурс]//Режим доступа: <https://rentenergo.ru/products/diesel-generators> (дата обращения 14.06.2024).

104.Дизель-генераторные установки. Информационный каталог. [Электронный ресурс] // Режим доступа: <https://albimax.ru/files/6.-DGU.pdf?ysclid=lxh24gi47z855430703> (дата обращения 14.06.2024).

105.ДЭС контейнерного типа [Электронный ресурс] // Режим доступа: <https://www.apaes.ru/tehnicheskie-harakteristikides?ysclid=lxh24re6a1294956416> (дата обращения 14.06.2024).

106. ДЭС Звезда. Информационная брошюра [Электронный ресурс] // Режим доступа: <https://electrichelp.ru/dizelnaya-elektrostantsiya-zvezda/> (дата обращения 14.06.2024).

107. Дизельные электростанции [Электронный ресурс] // Режим доступа: <https://adg-energy.ru/dizelnye-elektrostantsii/generatory-2400-kvt/> (дата обращения 14.06.2024).

108. Лезнов, Б.С. Энергосбережение и регулируемый электропривод в насосных и воздуходувных установках / Б.С. Лезнов. – М.: Энергоатомиздат, 2006. – 360 с.

109. Энергоресурсосберегающие режимы работы электротехнического комплекса воздушного охлаждения газа [Электронный ресурс] // Режим доступа: <https://uust.ru/media/dc/24247910/242/pashkin-vasiliiy-valerievich-2024-06-10/dissertation.pdf>. (дата обращения 08.10.2024).



## ПРИЛОЖЕНИЕ Б

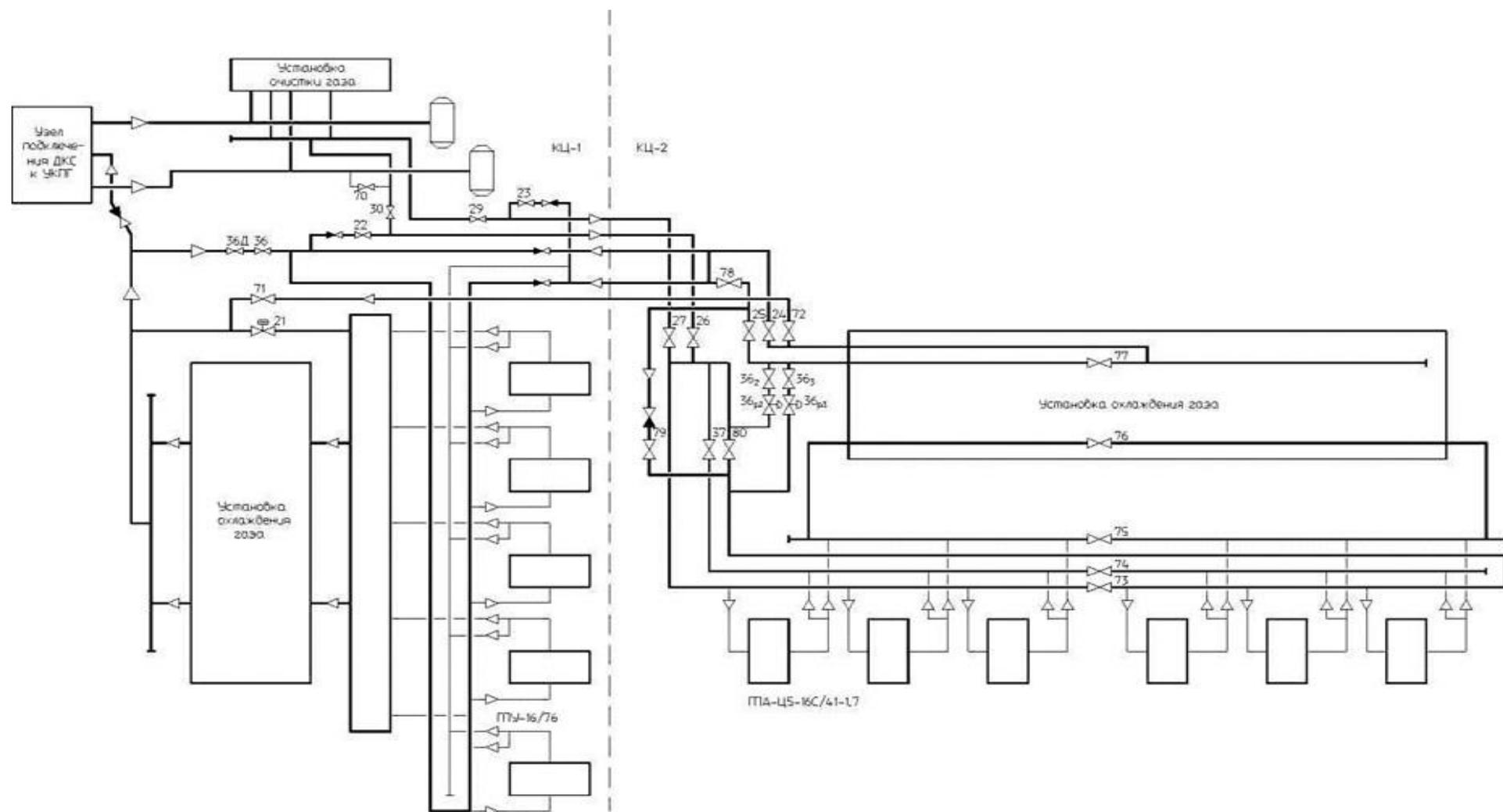


Рисунок Б.1 – Принципиальная схема ДКС

## ПРИЛОЖЕНИЕ В

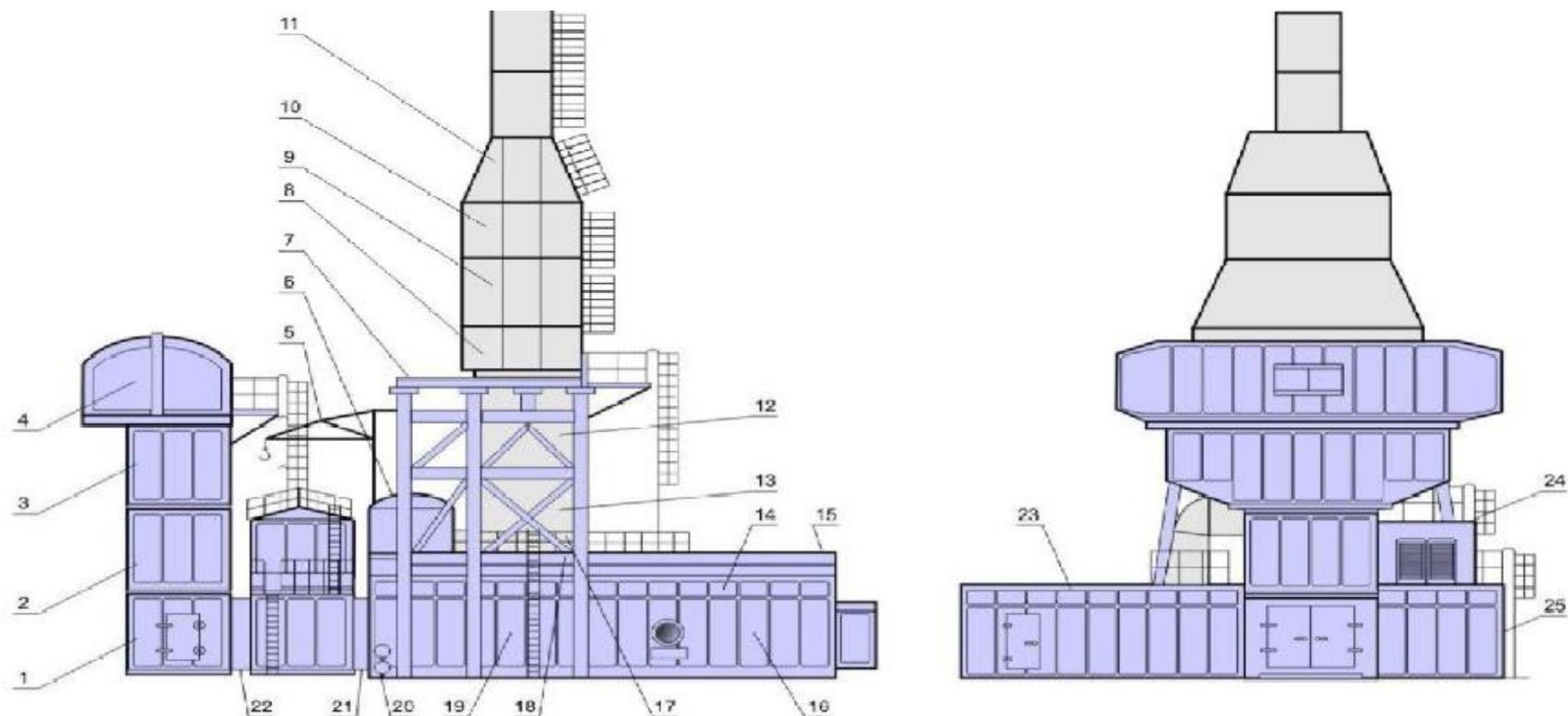


Рисунок В.1 – Устройство агрегата газоперекачивающего ГПА-Ц5-16:

- 1- камера всасывания; 2 - шумоплотитель всаса 2; 3 - шумопоглотитель всаса 1; 4 - устройство; 5-устройство грузоподъемное; 6 -блок вентиляции; 7-опора выхлопной шахты; 8-камера утилизатора; 9- камера утилизатора; 10- шумопоглотитель; 11- труба выхлопная; 12,13- диффузор; 14-турбоблок; 15,18-крыша; 16-отсек нагнетателя; 17-компенсатор; 19-отсек двигателя; 20-блок фильтров; 21,22-переходник; 23-блок автоматики; 24,25-блок систем.

## ПРИЛОЖЕНИЕ Г

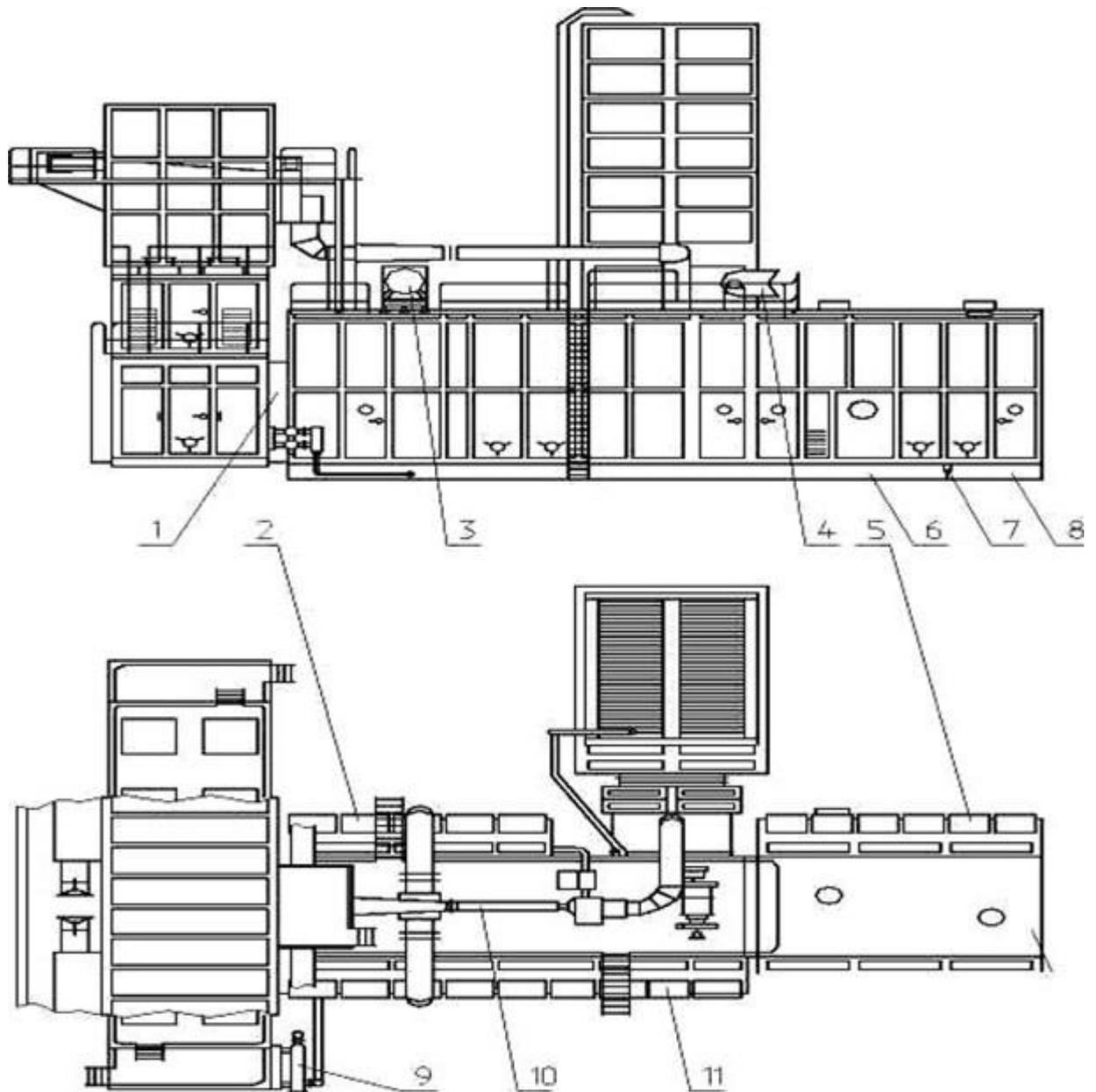


Рисунок Г.1 – Эскиз ГПУ-16:

- 1-переходник; 2,11- отсек двигателя; 3- вентилятор обдува системы охлаждения двигателя ДЖ59/Л2; 4- вытяжной вентилятор;  
 5- отсек нагнетателя; 6- рама фундаментная; 7- планка; 8- рама-подставка;  
 9- блок фильтров топливного газа;  
 10- система подогрева циклового воздуха.



## ПРИЛОЖЕНИЕ Е

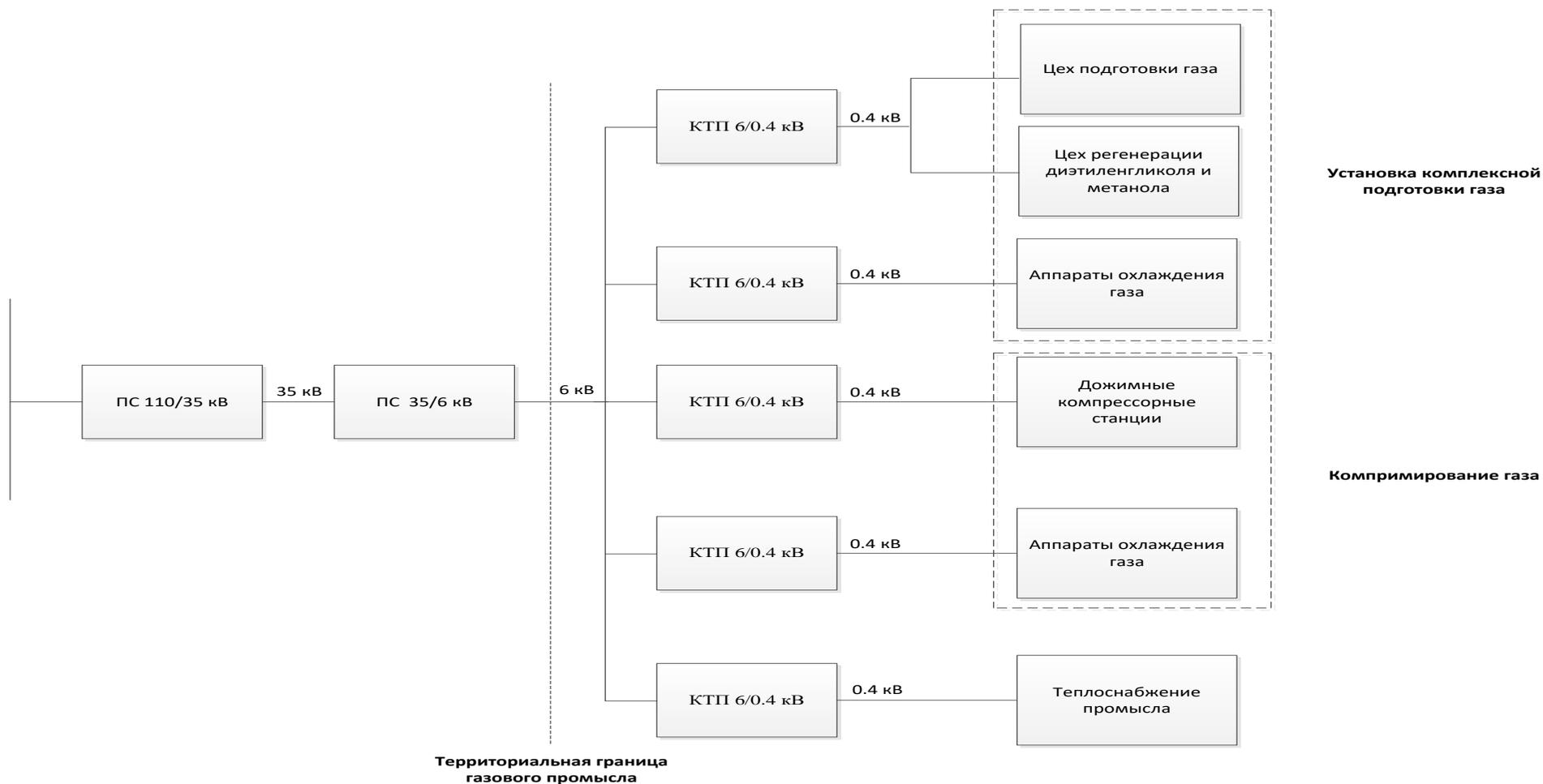


Рисунок Е.1 – Структурная схема централизованного электроснабжения ГП №1 ООО «Газпром добыча Ямбург»:  
ПС – подстанция; КТП – комплектно-трансформаторная подстанция

## ПРИЛОЖЕНИЕ Ж

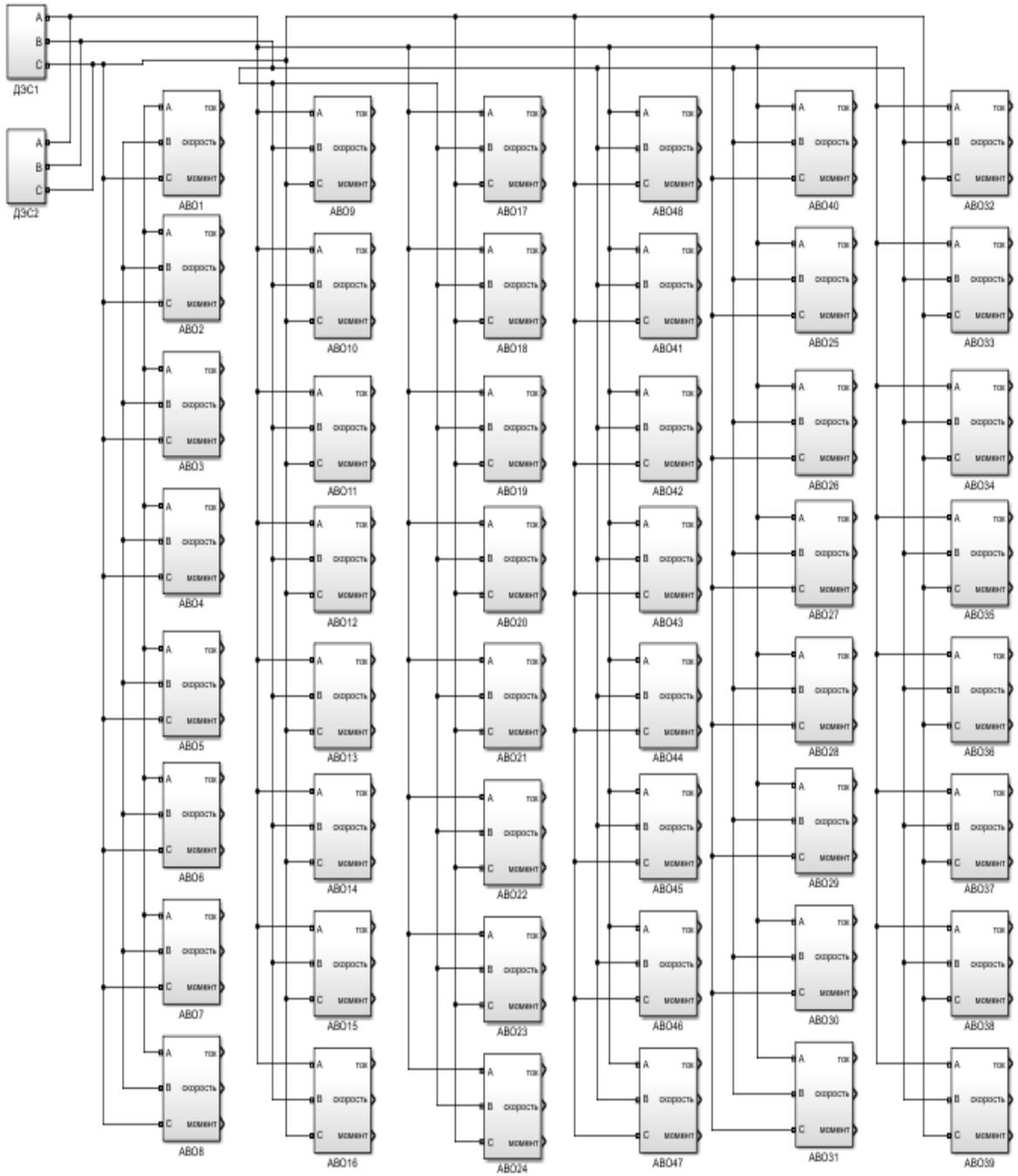


Рисунок Ж.1 – Модель работы автономной СЭС ЭТК-3 с ДЭС-1,2

## ПРИЛОЖЕНИЕ И



Рисунок И.1 – Патент на изобретение

## ПРИЛОЖЕНИЕ К

ООО «Газпром добыча Ямбург»

УТВЕРЖДАЮ



АКТ  
об использовании объекта патентных прав  
с « 01 » января 2024 по « 31 » декабря 2024

« \_\_\_ » \_\_\_\_\_ 20\_\_ г.

№ патента 2807138 Правообладатель ООО «Газпром добыча Ямбург».

Наименование объекта патентных прав «Система автоматического управления аппаратами воздушного охлаждения природного газа».

Правовая основа для использования объекта патентных прав \_\_\_\_\_  
Общество является правообладателем \_\_\_\_\_.

Наименование и реквизиты объекта техники, в котором использован объект патентных прав АСУ ТП УКПГ-1

Перечень технической и иной документации, на основании которой установлен факт использования объекта патентных прав: \_\_\_\_\_ отсутствует \_\_\_\_\_.

Способ использования объекта патентных прав: применение способа.Место использования объекта патентных прав: ЯНГКМ.

Реквизиты договора, при исполнении обязательств по которому использован объект патентных прав указанным в настоящем акте способом: \_\_\_\_\_ отсутствует \_\_\_\_\_.

Объемы использования объекта патентных прав: 1 УКПГ.

Настоящим актом подтверждается выполнение требований, на основании которых установлен факт использования объекта патентных прав указанным в настоящем акте способом.

Достигнут \_\_\_\_\_ иной полезный \_\_\_\_\_ эффект.  
(указать фактический, экономический или иной полезный)

Дата начала использования объекта патентных прав 01.01.2024.

И.о. Заместитель главного инженера  
по АиМО

Начальник филиала УАиМО

Начальник филиала ГПУ

И.о. А.В. Раузанов  
С.В. Завьялов  
С.И. Гункин  
М.Н. Макшаев